



DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

“DETERMINACIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN Y CARBONO
NEGRO POR LA QUEMA DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE ALGODÓN
CEBADA Y FRIJOL.”

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS E
INGENIERÍA AMBIENTALES

PRESENTA:

I.Q.MARCOS JOSUÉ MÉNDEZ GARCÍA

ASESOR DR. JOSÉ DE JESÚS FIGUEROA LARA

CIUDAD DE MÉXICO ENERO DE 2018

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) por el financiamiento brindado.

A la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco por la oportunidad de realizar los estudios de Posgrado

A mi Asesor el Dr. José de Jesús Figueroa Lara y la Dra. Violeta Múgica Álvarez por el apoyo brindado para la realización de este proyecto y por proveer todos los recursos y los medios para realizar esta investigación.

A la Dra. Naxieli Santiago de la Rosa por el apoyo y los conocimientos brindados para la realización de este proyecto así como el tiempo dedicado durante el periodo de este.

A la Dra. Mirella Gutiérrez Arzaluz por la ayuda que nos otorgó para los análisis de cromatografía.

A la M. en C. Griselda González Cardoso por el conocimiento que nos brindó en la teoría y la práctica para poder resolver dudas en el proyecto.

Al equipo de trabajo y amigos que estuvieron siempre apoyando, entretenido y divertido los momentos de trabajo, M. en C. Fernando Millán, los ingenieros ambientales, José Juan Domínguez, Daniel Rivera, José Jair González y Nayeli.

A mi familia de Maestría Sarai Vázquez González, Estephannie Trejo de la Mora, Anbu Landa Faz, José Antonio Santos Camacho y Luis Antonio Barbosa Noegerat.

DEDICATORIAS

A mi padre el Sr. Marcos Méndez Mendoza que siempre me ha apoyado e insiste que siga haciendo las cosas y no me rinda.

A mi madre la Sra. Margarita García Lira que siempre me ha animado a seguir adelante sin importar las circunstancias y que siempre ha confiado en mí.

A mis padres en la CDMX que me apoyaron durante mi estancia en su casa Luis Vera y Magdalena Méndez.

A mis hermanos Cristian Omar, Juan Carlos y su esposa Jacqueline Julieta, Laura Sarai y su esposo Josué Sánchez que siempre me han apoyado sin importar las circunstancias.

A mis sobrinos que son el motor pequeño de la casa.

A mi niña Yeslin Cecilia que me dice que siga adelante y me hace Feliz

A mi primo Enrique Méndez y la tía Martha Méndez que siempre estuvieron pendientes y apoyándome en todo momento.

A mis familiares y amigos.

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.	3
2.1 El efecto invernadero	3
2.2 Emisiones de gases y partículas por quema agrícola	5
2.3 Dióxido de Carbono CO ₂	5
2.4 Monóxido de Carbono.....	6
2.5 Metano.	8
2.6 Partículas suspendidos.....	9
2.7 Carbono negro	11
2.8 Cultivos en México	11
2.9 El algodón.....	12
2.9.1 <i>Especies de algodón</i>	13
2.9.2 Producción mundial.....	14
2.9.3 <i>Producción en México</i>	14
2.10 La Cebada	16
2.10.1 <i>Producción mundial</i>	17
2.10.2 <i>Producción en México</i>	17
2.11 El Frijol	20
2.11.1 <i>Producción en México</i>	21
2.12 Quema de residuos agrícolas.....	22
2.13 Factores de emisión.....	22
2.14 Justificación	23
2.15 Objetivo General.....	24
Objetivos Específicos.....	24
III. METODOLOGÍA.....	25
3.1 Recolección de residuos	25
3.2 Análisis fisicoquímicos de los residuos	25
3.3 Desarrollo experimental de quema e instrumentación	25
3.4 Cámara de combustión.....	31

3.5	Caracterización de las especies	34
3.6	Muestreo Isocinético	35
	Tabla 4: Localización de puntos transversales en la chimenea.....	42
3.7	Análisis de carbono orgánico y elemental	42
3.8	Determinación de factores de emisión de los distintos contaminantes	43
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1	Composición elemental de los residuos	44
4.2	Factores de Emisión obtenidos para los distintos residuos.....	44
4.3	Cálculo de emisiones	52
V.	CONCLUSIONES.....	54
VI.	REFERENCIAS	56

Índice de figuras

Figura 1: Emisiones a la atmósfera y balance energético	4
Figura 2: Figura Tridimensional de la molécula de CO ₂	5
Figura 3: Figura Tridimensional de la molécula de CO.....	6
Figura 4: Contaminación por CO	8
Figura 5: Figura Tridimensional de la molécula de CH ₄	8
Figura 6: En las PM ₁₀ se pueden distinguir dos fracciones, la fracción gruesa, es decir, entre 2,5 y 10 micrómetros y la fracción fina, menor a 2,5 micrómetros.....	10
Figura 7: Composición típica de las partículas PM ₁₀ y PM _{2.5}	10
Figura 8: Planta de Algodón	13
Figura 9: Fotografía de la cebada.....	16
Figura 10: Principales estados productores de cebada en México.....	17
Figura 11: Planta de frijol.	20
Figura 12: Producción de frijol en México.	21
Figura 18: Diagrama de flujo del proyecto.....	30
Figura 19: Diseño de equipo para simular quemas a cielo abierto	31
Figura 20: Equipo isocinético Apex XC 500.....	32
Figura 21: Analizador de gases.....	33
Figura 22: Tren de muestreo isocinético para partículas	38
Figura 23: Ejemplos de muestreo en chimenea	39
Figura 24: Tubo Pitot tipo S.	40
Figura 25: Analizador EC/OC Sunset Lab.....	43
Figura 26: Comparación de los FE de partículas por la quema de los 3 residuos	48
Figura 27: Comparación de los FE de CN y OC por la quema de los 3 residuos.....	48
Figura 28: Comparación de los FE de partículas por la quema de los 3 residuos	49
Figura 29: Comparación de los FE de partículas por la quema de los 3 residuos	49

Índice de tablas

Tabla 1: Composición media de la atmosfera por debajo de 25 Km.....	4
Tabla 2: Producción total del cultivo y residuos generados por algodón cebada y frijol.....	12
Tabla 3: Siembra y cosecha del algodón en México	14
Tabla 4: Localización de puntos transversales en la chimenea.....	42
Tabla 5: Análisis elemental de los residuos	44
Tabla 6: Factores de emisión de PM10 para residuos de algodón	44
Tabla 7: Factores de emisión de PM2.5 para residuos de algodón	44
Tabla 8: Factores de emisión de gases para residuos de algodón.....	45
Tabla 9: Factores de emisión de PM10 para residuos de cebada	45
Tabla 10: Factores de emisión de PM2.5 para residuos de cebada	46
Tabla 11: Factores de emisión de gases para residuos de cebada.....	46
Tabla 12: Factores de emisión de PM10 para residuos de frijol.....	46
Tabla 13: Factores de emisión de PM2.5 para residuos de frijol.....	47
Tabla 14: Factores de emisión de gases para residuos de frijol.....	47
Tabla 15: Comparación de los factores de emisión obtenidos con los reportados.....	51
Tabla 16: Datos de cosecha y quema de los diferentes cultivos	52
Tabla 17: Estimación de residuos incinerados	52
Tabla 18: Estimación de emisiones anuales de partículas y	53

I. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola es muy importante para asegurar la alimentación del país, sin embargo, dentro de las prácticas agrícolas, la quema de los residuos generados es una actividad común principalmente para los pequeños y medianos agricultores, por lo que se observan grandes plumas de humo que contaminan la atmósfera de las localidades y de ciudades o poblaciones cercanas. La combustión incompleta de biomasa genera, por una parte, contaminantes atmosféricos como son las partículas, los compuestos orgánicos volátiles (COV's) y gases, y por otra parte contaminantes climáticos como el bióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4); además, los óxidos de nitrógeno (NO_x) actúan indirectamente como un gas de efecto invernadero (GEI) debido a que reacciona con gases troposféricos y producen ozono a través de reacciones fotoquímicas (Bachman, 2005; IPCC, 2007).

En la actualidad el cambio climático se debe al cambio en la composición del aire y se ha convertido en la preocupación ambiental más importante en el mundo. El incremento en el calentamiento global se debe principalmente a los GEI y México es uno de los quince principales países emisores de GEI a nivel mundial, (DGDC 2015).

El carbono negro (CN) se encuentra clasificado como un contaminante climático de vida corta (CCVC) y es considerado dentro de los contaminantes ambientales más importantes que degradan nuestra calidad del aire. El CN es el segundo contaminante que favorece al calentamiento global después del CO_2 que es el GEI más importante (AIDA, 2011); se ha reportado que la reducción de los contaminantes climáticos de vida corta podría disminuir en 20% la velocidad de la elevación del mar (CCAC, 2014).

Otros CCVC además del CN son el metano (CH_4), el ozono troposférico (O_3), y algunos hidroclorofluorocarbonos (HCFCs); estos son catalogados como agentes atmosféricos que permanecen en la atmosfera por un periodo corto de tiempo (Molina et al., 2013). Algunos de ellos también degradan la calidad del aire, aumentando el riesgo de padecer enfermedades respiratorias y cardíacas. El

carbono negro y el ozono son algunos de los contaminantes que provocan millones de muertes prematuras al año, debido a los daños producidos a las vías respiratorias y al sistema cardiovascular especialmente en poblaciones en mayor situación de vulnerabilidad, (Ortúzar et. al., 2016).

El Carbono Negro se encuentra en las partículas y es el único de los CCVC que no es propiamente un GEI sino un aerosol, subproducto de una combustión incompleta e ineficiente en los vehículos a motores a diésel y en autos con mantenimiento deficiente, así como de incendios forestales, quemas de residuos agrícolas, fábricas y casas que utilizan la madera como fuente de energía (Seddon et. al, 2009). El carbono negro se encuentra dentro de las partículas, las cuales pueden clasificarse por su tamaño, las que tienen un diámetro aerodinámico igual menor a 10 micrómetros se denominan PM_{10} y las que tienen un diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetros se denominan $PM_{2.5}$.

Se estima que el 20% del carbono negro que se emite es debido a la quema de biocombustibles, de acuerdo a (Ramanathan et. al, 2008) un 40% es por combustibles fósiles y un 40% es por la quema de biomasa al aire libre, el 20 % restante es por emisiones diversas.

Entre las fuentes principales de la emisión de carbono negro está la quema de residuos agrícolas. En muchos países realizar dicha quema de residuos continua siendo una de las maneras más fáciles, rápidas y económicas de deshacerse de los residuos, preparar el terreno para la siguiente cosecha, además de que al realizar esta actividad se liberan algunos nutrientes para el siguiente ciclo productivo y se lleva a cabo la eliminación de ciertas plagas de los campos de cultivo (CCA, 2014).

La emisión de carbono negro es relativamente baja comparada con las emisiones de metano y el dióxido de carbono, pero esto no lo hace menos dañino debido a que este contaminante tiene además la capacidad de absorber la radiación solar, la cual a su vez es emitida como radiación infrarroja por ello hay una incidencia de la radiación en la superficie (AIDA, 2011).

Es sumamente importante cuantificar las cantidades emitidas de estos contaminantes para lograr un control eficiente de las emisiones que alteran la composición y la temperatura, dicha cuantificación se establece a través de la obtención de los distintos factores de emisión de las fuentes que los producen, tal como es el caso de la quema de los distintos residuos agrícolas.

En este trabajo se realizó la determinación de los factores de emisión de los contaminantes climáticos y atmosféricos debidos a la quema de residuos de algodón, cebada y frijol.

II. ANTECEDENTES.

2.1 El efecto invernadero

El efecto invernadero genera en una primera etapa un calentamiento de la superficie de la tierra, la cual, a su vez, induce por convección un aumento de la temperatura de los gases. La capa de gases que retienen el calor del sol presente en la atmosfera hace que la temperatura interior sea más alta (RDU 2007).

Cuando la energía generada por el sol entra en la tierra como frecuencia alta (luz ultravioleta) y regresa como una frecuencia más baja (luz infrarroja) se produce el fenómeno del efecto invernadero. El efecto invernadero se presenta al existir una atmósfera capaz de absorber radiación infrarroja por medio del carbono negro y por gases tales como el CO₂, el vapor de agua, el ozono, el óxido nitroso (N₂O), el metano y los clorofluorocarbonos (Figura 1).



Figura 1: Emisiones a la atmósfera y balance energético

Fuente: Greenpeace, 2009.

La composición química de la atmósfera es una mezcla de diversos compuestos, los principales son el nitrógeno (N_2) y el oxígeno (O_2), que abarcan la mayor parte de la composición, mientras que otros compuestos como son el argón (Ar) el dióxido de carbono, el metano, el ozono y el hidrógeno (H_2) entre otros, como se muestra en la tabla 1 (Barry, et al., 2003).

Compuesto	Símbolo	% Volumen	Peso molecular
Nitrógeno	N_2	78.08	28.02
Oxígeno	O_2	20.95	32.00
Argón	Ar	0.93	39.88
Dióxido de Carbono	CO_2	0.037	44.00
Neón	Ne	0.0018	20.18
Helio	He	0.0005	4.00
Ozono	O_3	0.00006	48
Hidrogeno	H	0.00005	2.02
Kriptón	Kr	0.0011	82.9
Xenón	Xe	0.00009	130.20
Metano	CH_4	0.00017	

Tabla 1: Composición media de la atmosfera por debajo de 25 Km
Fuente: Barry 2003

2.2 Emisiones de gases y partículas por quema agrícola

Las emisiones de GEI por la agricultura representan entre el 10 y 12 por ciento de las emisiones totales con 5.2 a 5.8 Gt de CO₂ eq (FAOSTAT, 2013). Entre las emisiones del sector agricultura se destacan las de la quema de residuos agrícolas que es una práctica común en muchas zonas agrícolas para eliminar el residuo de forma económica y rápida.

2.3 Dióxido de Carbono CO₂

El dióxido de carbono (Figura 2) es un gas inerte a condiciones normales y que se produce principalmente como un sub-producto de la combustión y aunque está en pequeñas proporciones en la atmósfera es importante debido a que es el principal gas de efecto invernadero (IDEAM 2007). Este GEI contribuye a mantener dentro de un rango aceptable la temperatura de la atmósfera de la tierra, sin embargo en la actualidad, es responsable de casi el 76 % del calentamiento global previsto para los próximos años (Colque et. al., 2007)

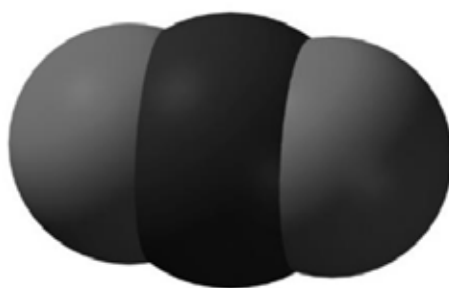


Figura 2: Figura Tridimensional de la molécula de CO₂

Fuente: Medina 2010

Este gas, si se encuentra en un área cerrada en altas concentraciones, puede ser peligroso debido a que desplaza al aire que inicialmente llenaba tal área y producir

asfixia. El CO_2 contribuye al calentamiento global, pero por otra parte su presencia es vital para el desarrollo de las plantas ya que forma parte del proceso de fotosíntesis para producir clorofila y nutrientes en estos seres vivos (Medina 2010).

El CO_2 es el GEI antropogénico de mayor importancia debido a que sus emisiones anuales aumentaron en un 80% entre los años de 1970 y 2004, su aumento en la concentración mundial se debe principalmente al uso de combustibles de origen fósil, y por otra parte a los cambios de uso de suelo; se proyecta un aumento de las emisiones mundiales de GEI entre un 25% a 90% entre el año 2000 y 2030 considerando que los combustibles fósiles sigan manteniendo su posición dominante como fuente de energía hasta ese año como mínimo (Solís et. al., 2016).

2.4 Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono es un gas tóxico menos denso que el aire, es incoloro e inodoro además de que es un gas no irritante, este gas es generado por la combustión incompleta de materiales orgánicos o que contengan carbono (Figura 3). Debido a que el CO es un gas "invisible y silencioso", sus características no permiten, en muchos casos, que nos demos cuenta del peligro que éste representa, dado que este gas puede causar la muerte por inhalación (García 2011).

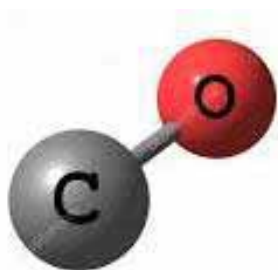


Figura 3: Figura Tridimensional de la molécula de CO .

Fuente: Medina 2010

El CO presenta una gran afinidad por la hemoglobina que puede ser 250 veces mayor que la del oxígeno (Buchelli et. al 2014), esto hace que la carboxihemoglobina sea incapaz de transportar oxígeno y cuando dos tercera partes de la hemoglobina se han saturado puede causar la muerte a partir de 5,000 ppm, la inhalación periódica de este gas provoca problemas cardiovasculares (Myers et al., 1979).

La EPA (Agencia de Protección Ambiental por sus Siglas en Inglés) tiene establecido un límite ambiental de 10 μg por metro cúbico ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en el aire promedio en exposición de 8 horas, mientras que en México la Norma de Salud ambiental NOM-021-SSA1-1993 para evaluar la calidad del aire establece como máximo permisible 11 ppm en promedio móvil de 8 horas para el monóxido de carbono. En el caso de ambiente laboral, la OSHA ha establecido un límite legal de 55 mg por metro cúbico ($55\text{mg}/\text{m}^3$) para una exposición en jornada de trabajo de 8 horas.

Cuando hay presencia de monóxido de carbono lugares cerrados este puede ser tóxico. Sus principales fuentes de contaminación en la atmosfera son (UNEP, 2011) (Figura 4):

- Humo de vehículos
- Estufas.
- Humo de cigarros.
- Incendios.
- Anafres.
- Calentadores.
- Chimeneas.
- Quema de basura.
- Quema de Residuos Agrícolas.
- Calderas y hornos.
- Otras fuentes de combustión



Figura 4. Contaminación por CO
Fuentes de emisión de CO

2.5 Metano.

El metano, también considerado uno GEI, juega un papel importante en la determinación de la capacidad de oxidación de la troposfera (Figura 5). Este al igual que el CO_2 , es producido por la combustión de combustibles fósiles y de biomasa, además de ser emitido por la descomposición de la materia orgánica (IPCC, 2013).

El metano ha contribuido en aproximadamente en un 20% del forzamiento radiativo directo debido a emisiones antropogénicas. El metano es removido de la atmósfera por su reacción con radicales hidroxilo (OH) convirtiéndose finalmente en CO_2 , y tiene un potencial de calentamiento global de 28 (IPCC, 2013).

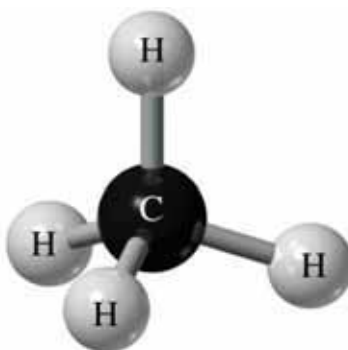


Figura 5: Figura Tridimensional de la molécula de CH_4 .
Fuente. Medina 2010.

La fuente principal de CO es la descomposición de la materia orgánica en sistemas biológicos, además de que están muy relacionadas con actividades de disposición de residuos sólidos, Tratamientos Anaerobios de aguas residuales domesticas e industriales y actividades agrícolas (IPCC, 2007), como son:

- Fermentación entérica como consecuencia del proceso digestivo de los herbívoros
- Descomposición en condiciones anaerobias (sin oxígeno) del estiércol generado por especies pecuarias
- Cultivos de arroz bajo riego
- Quemadas de pastizales y residuos agrícolas.

2.6 Partículas suspendidos

Las partículas suspendidas son contaminantes que varían en composición y tamaño, y son las especies que más significativamente se han asociado a eventos de mortalidad y morbilidad en la población (Pope y Dockery, 2006).

Las partículas se dividen en tres clases debido a su tamaño (Figura 6):

- Partículas suspendidas totales, son todas aquellas partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfera y que poseen un diámetro menor a 60 micrómetros (μm).
- Partículas gruesas con un diámetro igual o menor a 10 μm , es decir PM_{10} , de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA), si bien existe una aparente relación entre la exposición de corto plazo y los efectos respiratorios y cardiovasculares, no existe aún evidencia suficiente para constatar potenciales efectos por exposición de largo plazo (EPA, 2009)
- Partículas finas con un diámetro igual o menor a 2.5 μm o $\text{PM}_{2.5}$, están compuestas por partículas suficientemente pequeñas que penetran en las vías respiratorias hasta llegar a los pulmones y los alvéolos, lo que aumenta el riesgo de mortalidad prematura por efectos cardiopulmonares, en

exposiciones de corto y largo plazo, las $PM_{2,5}$ se consideran el contaminante más agresivo para la salud de las personas (CONAMA, 2010).

En muchos estudios se ha demostrado que las composiciones típicas de las partículas PM_{10} y $PM_{2,5}$ contienen una diversidad de compuestos como son sulfatos, nitratos, carbono orgánico, y carbono negro, entre otros, como se muestra en la figura 7.

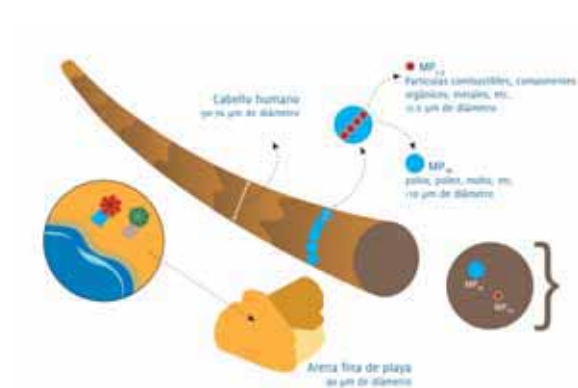


Figura 6: En las PM_{10} se pueden distinguir dos fracciones, la fracción gruesa, es decir, entre 2,5 y 10 micrómetros y la fracción fina, menor a 2,5 micrómetros.



Figura 7: Composición típica de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$

2.7 Carbono negro

El carbono negro es el principal componente del hollín, producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles o de biomasa; existe en forma de partícula en la atmósfera y tiene un fuerte efecto de calentamiento en la tierra porque intercepta la luz del sol y absorbe la luz visible teniendo un efecto de calentamiento, además de que puede influir en la formación de nubes (UNEP, WMO, 2011). El término “negro” se refiere a que absorbe la luz visible por lo que puede cuantificarse la atenuación de luz que produce en una luz reflejada o transmitida a través de un filtro, entre los métodos ópticos utilizados para determinar las concentraciones de CN y OC están los etalómetros y los fotómetros de absorción para hollín, mientras que si se utiliza un método termo óptico, que implica la oxidación de las partículas de carbono a diferentes temperaturas, se utiliza el término de carbono elemental en lugar de carbono negro (Bond et al., 1999). En un reporte de la Organización Mundial de la Salud se define al carbono negro como “aquellos componentes oscuros de las partículas que absorben la luz y que contienen dos formas de carbono elemental” (Janssen et al., 2012).

Por otra parte, el carbono elemental es el proveniente de fuentes de combustión que contiene dos formas de carbono, el carbonizado que tiene la estructura similar a la del grafito de color café y la estructura del carbón natural color negro con propiedades químicas y físicas distintas; el carbono negro o elemental es el mayor contribuyente en la absorción de luz, puesto que absorbe la luz por la conducción de electrones que están asociados con la estructura del grafito y su eficiencia de absorción se ha estimado entre 2 a 20 m²/g (Janssen et al., 2012). Sin embargo se han reportado en estudios entre laboratorios, diferencias hasta un factor de 2 entre los diferentes métodos térmicos dependiendo del protocolo y el tipo de muestra (Watson et al., 2005).

2.8 Cultivos en México

México le ha dado una gran importancia a las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático, para lo cual necesita inventarios más precisos basados en factores de emisiones regionales o nacionales. La quema de residuos y productos

agrícolas produce grandes volúmenes de contaminantes, por lo que el determinar factores de emisión por dichas prácticas en México, tiene gran relevancia para alcanzar una mayor precisión en los inventarios de emisión y formular políticas de mitigación al cambio climático relacionadas con dichas prácticas.

En México existen muy pocos reportes sobre el impacto de las quemas agrícolas, Mugica et al., (2015), estudiaron el impacto en el ambiente de las zonas cercanas a zonas cañeras de Veracruz, Chiapas y Morelos; asimismo se obtuvieron factores de emisión por la quema de caña (Mugica, 2012). A nivel internacional se han determinado factores de emisión para el arroz, maíz y trigo principalmente (Hays et al., 2005; Dhammapala et al., 2007; Zhang et al., 2008), por ser los cereales más cultivados, sin embargo en México se requiere conocer los factores de emisión por la quema de residuos de otros cultivos importantes como son el algodón, la cebada y el frijol. En la tabla 2 se presenta la cantidad estimada de residuos que se queman en el sector agropecuario por el INEGyCEI (Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 2013) del cultivo de frijol, cebada y algodón así como la cantidad de producto cosechado.

	Producción anual Gg de Cultivo	Cantidad de residuos secos Gg	Cantidad de residuos quemados Gg	Porcentaje de residuos quemados %
Algodón	587.34	1,762.01	317.16	18.00
Cebada	600.77	1,381.77	248.72	18.00
Frijol	1,294.63	1,683.02	302.94	18.00

Tabla 2: Producción total del cultivo y residuos generados por algodón cebada y frijol.

Fuente: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. INECC, 2013.

2.9 El algodón

El algodón mexicano o conocido por su nombre científico como *Gossypium hirsutum* pertenece a la familia Malvácea, a la tribu *Gossypieae* y al género *Gossypium* (Cronquist, A. 1981). La planta de algodón tiene un tallo erecto y con

ramificación regular, las hojas son pecioladas, de un color verde intenso, grandes y con los márgenes lobulados, están provistas de brácteas (Retes L. 2015). Esta planta tiene cinco pétalos grandes (de color llamativo, blanco, blanco cremoso, o aún en colores), que pronto caen, abandonando cápsulas “o cápsulas de algodón”, teniendo una capa gruesa y rígida externa (Figura 8) (SAGARPA 2013).

Las flores son dialipétalas, grandes, solitarias y penduladas. La corola está formada por un haz de estambres que rodean el pistilo. Se trata de una planta autógama. Aunque algunas flores abren antes de la fecundación, produciéndose semillas híbridas. El fruto es una cápsula en forma ovoide con tres a cinco carpelos, que tienen seis a diez semillas cada uno, es de color verde durante su desarrollo y oscuro en el proceso de maduración. Las células epidérmicas de las semillas constituyen la fibra llamada algodón. La longitud de la fibra varía entre 20 y 45 cm, y el calibre, entre 15 y 25 micras con un peso de 4 a 10 g (Retes 2015).



Figura 8: Planta de Algodón
Fuente: SAGARPA

2.9.1 Especies de algodón.

En el mundo hay diferentes especies de algodón que crecen de manera silvestre, pero no todas las especies son económicamente viables, solo son cinco tipos de algodón que se cultivan comercialmente en todo el mundo, algunos de estos son

conocidos y los vemos en los comercios todos los días. Estos tipos son el "egipcio", "sea island", "pima", "asiático" y "upland". Estos diversos tipos tienen algún parecido, pero difieren en el color de las flores, la fibra y el tiempo de floración (Pérez. 2012).

2.9.2 Producción mundial

En el mercado mundial de algodón China es el principal productor, seguido de la India, USA, Pakistán y Brasil. En México se obtuvo una producción variada de algodón de 593,439.49 toneladas en 133,575.74 hectáreas sembradas (SIAP, 2015).

2.9.3 Producción en México

En México los estados con que tuvieron una mayor productividad del algodón fueron Chihuahua, Baja California y Coahuila seguidos por Sonora, Durango y Tamaulipas para el año 2015 como se muestra en la tabla 3 que son las únicas regiones algodoneras en la actualidad, sabiendo que Sinaloa desde el 2009 ya no lo produce (Plan Rector del Algodón, 2012).

Estado	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Producción (ton)
Chihuahua	89,751.00	89,687.36	401,606.73
Baja California	18,957.00	18,943.00	93,432.24
Coahuila	14,579.53	14,494.03	61,954.82
Sonora	3,982.50	3,982.50	16,924.75
Durango	2,932.41	2,915.11	12,150.44

Tabla 3: Siembra y cosecha del algodón en México

El algodón mexicano de género *Gossypium* comprende 50 especies de las cuales 14 se distribuyen en México, que son: (Pérez. 2012).

- *G. thurberi* Tod.
- *G. armourianum* Kear.
- *G. harknessii* Brandg.
- *G. davidsonii* Kell
- *G. aridum* (Rose and Standl) Skov.
- *G. raimondii* Ulbr.

- *G. gossypioides* (Ulbr.) Standl.
- *G. lobatum* Gentry.
- *G. laxum* Phillips.
- *G. trilobum*
- *G. turneri* Fryx.
- *G. lanceolatum* Tod.
- *G. hirsutum* L.
- *G. barbadense* L.

Para el año de 2016 la producción de algodón fue de 487,914.28 toneladas en México, con una superficie sembrada de 104,586.69 hectáreas y las cosechadas de 104,374.19 hectáreas (SIAP 2017).

En el estado de Sonora hay tres especies que se cultivan que son: *G. thurberi* Tod, *G. davidsonii* Kell, *G. turneri* Fryx (Pérez 2012). En el ciclo 2005 se tuvo la mayor superficie sembrada con un valor de la producción de 250,603 millones de pesos sin embargo, en el periodo 2011 con la superficie sembrada fue menor, el valor de la producción por tonelada fue de \$512,120.00 debido a que el precio medio rural fue de 6,818 por tonelada mientras que en el primero de ellos fue de 3,669 por tonelada (Retes, 2015).

En el estado de Chihuahua la especie que se cultiva es *G. thurberi* Tod (Pérez. 2012). Por lo que se refiere a este estado la producción de algodón, se ha incrementado año con año, registrándose los volúmenes de producción con más de 100 mil toneladas entre los años 2003 al 2009; cabe señalar que en el año 2006 es donde se presenta la mayor producción con un total de 245,876 toneladas (SAGARPA 2013).

La producción de algodón en el estado de Chihuahua, se concentra en cinco zonas, destacando la región de Ojinaga con el mayor volumen generado en 2008, con más de 84 mil toneladas y en el 2009 con 55,232 toneladas. Luego le sigue la región de Casas Grandes con un volumen de producción de 80,593 toneladas para el año 2008, y en donde para el año 2009, la producción fue menor, ubicándose en las 38,676 toneladas producidas (SAGARPA 2013).

En el estado de Baja California las especies que se cultivan son: *G. thurberi* Tod, *G. armourianum* Kear, *G. harknessii* Brandg, *G. davidsonii* Kell, *G. barbadense* L (Pérez. 2012). Por lo que se refiere al estado de Baja California es el segundo estado en producción con una superficie destinada para la siembra de algodón que va de 13 mil a 23 mil hectáreas, con volúmenes que van de las 40 mil a casi las 90 mil toneladas de algodón por año. La mayor producción se concentra en los años 2001, 2006, 2007 y 2008, donde se registran producciones de más de 80 mil toneladas (SAGARPA 2013).

2.10 La Cebada

La cebada conocida por sus nombres científicos como *Hordeum distichum* L., y como *Hordeum Vulgare* L. (NMX-FF-043-SCFI-2003), son plantas de la familia de las gramíneas (Poáceas), herbácea, monocotiledónea, anual y hermafrodita de fecundación autógama (Alcasena 2012), que tiene gran importancia para el consumo humano y animal después del tiempo de cosecha (figura 9) en México y el mundo se utiliza para la producción de malta para cerveza y en menor proporción se consume como forraje (Navarrete 2015).



Figura 9: Fotografía de la cebada.
Fuente: Sagarpa

2.10.1 Producción mundial

En el mercado mundial de cebada, Rusia es el principal productor, seguido por Alemania, Canadá, Francia y España. El grano de la cebada es primordial para la elaboración de la malta en la elaboración de la cerveza y México es uno de los principales exportadores de esta bebida.

2.10.2 Producción en México

Para el año de 2016 la producción en México de cebada fue de 978348.57 toneladas, de la cual la superficie sembrada fue de 334270.3 hectáreas y la superficie cosechada de 329745.3 hectáreas (SIAP 2017). Se produce en 18 estados del país, el Altiplano Central es la principal zona productora de cebada maltera, ya que en esa zona se encuentra el 75% de la agroindustria maltera, siendo los estados de Hidalgo, México, Puebla y Tlaxcala (figura 10) quienes producen alrededor del 70% en condiciones de temporal (Aguilar y Schwentesius, 2004).

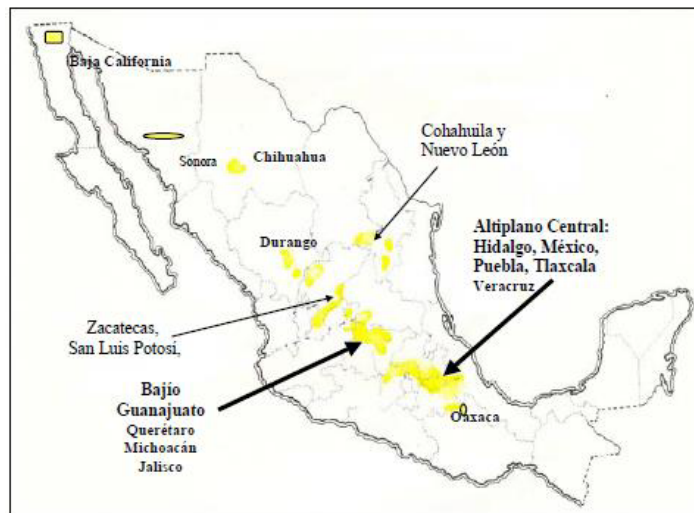


Figura 10: Principales estados productores de cebada en México
Fuente. (Sagarpa-Firco, 2009)

Esta planta tiene un tallo que es erecto, grueso, formado por unos 6 u 8 entrenudos, los cuales son más anchos en la parte central que en los extremos junto a los nudos (tallo aplastado, no cilíndrico). La altura de los tallos depende de

las variedades y oscila desde 50 cm a 1 m. Sus flores son autóгамas; se abren después de haberse realizado la fecundación, lo que tiene importancia para la conservación de los caracteres de una variedad determinada (SIAP, 2017). La producción de la planta tiene gran importancia socioeconómica en México, debido a que representa el ingreso de miles de familias que habitan en zonas productoras de los Valles Altos de la mesa central, así como su utilización de materia prima para la industria maltera, forrajera y en menor proporción como alimento humano. Para la producción de la malta para la cerveza se utiliza la cebada de seis hileras (*Hordeum Vulgare L*), mientras que la cebada de dos hileras presenta mejores características para obtener una cerveza de mejor calidad (Navarrete 2015).

En el periodo de 1998 a 2008, el volumen de producción de cebada pasó de 137.7 millones de toneladas en 1998 a 157.6 millones en 2008 con una TMAC de 1.2%. Los tres principales productores obtuvieron el 70% de la producción mundial, los tres primeros lugares correspondieron a Rusia con una producción de 12%, seguida de Alemania con una producción del 9% y finalmente Canadá con una producción del 8%, de ahí en adelante las posiciones 4 a 11 se encuentran Francia, España, Ucrania, Turquía, Australia, Reino Unido, Estados Unidos y Dinamarca de acuerdo a la Figura 11 (Caballero 2009).

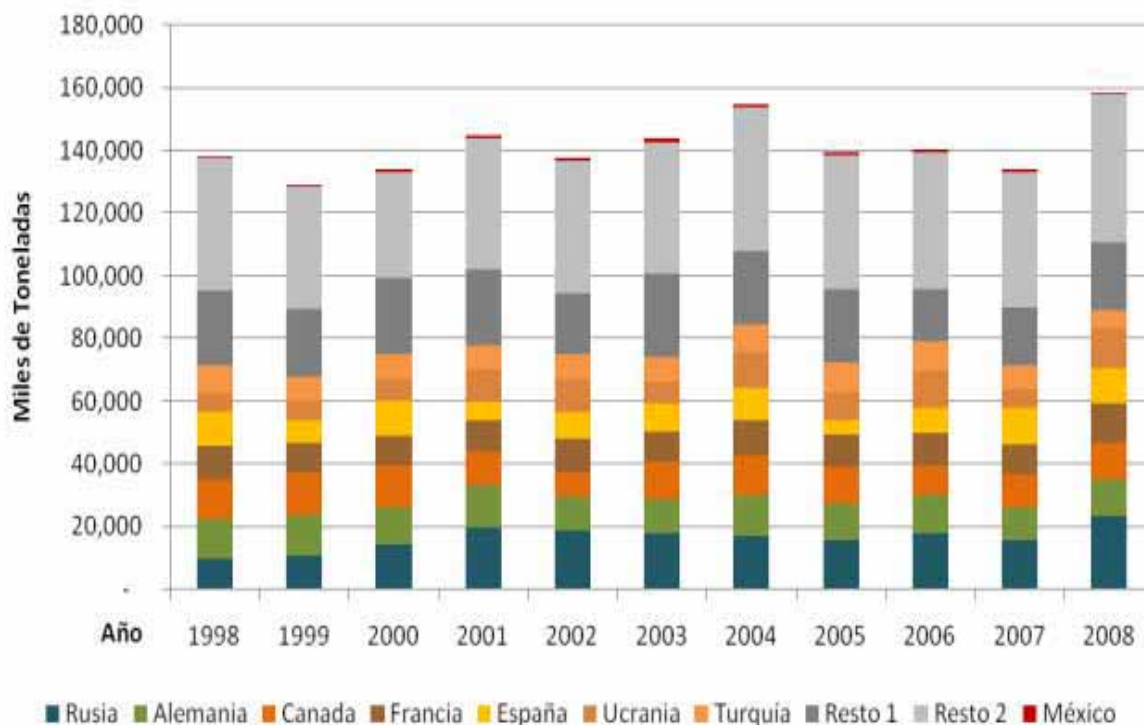


Figura 11. Producción de cebada en el mundo
Fuente Caballero 2009

En el período 2000–2010, la producción nacional de cebada presentó una tasa de crecimiento media anual de 3.31%, en cambio la tasa de crecimiento de la producción de cebada de los Valles Altos de la mesa central de México registró una tasa de 5%, estas estadísticas reflejan la variabilidad climática en la producción en condiciones de temporal, mientras que en condiciones de riego se mantiene o incrementa el crecimiento medio anual de la superficie sembrada y por un mejor control de los factores que intervienen en la producción (Navarrete 2015).

La producción presenta así gran variabilidad, mientras que en 2003 se alcanzó una producción de 1.1 millones de toneladas con un valor de 1,787 mdp, en 2013 se alcanzó cerca de la mitad, 594 mil toneladas con un valor de 2,153 mdp. La producción de cebada se concentra en el centro del país, siendo los estados más importantes Hidalgo, Tlaxcala, Guanajuato, Estado de México y Puebla, que en conjunto aportaron el 92% del volumen y valor generados en 2013 (FNDARFP 2014).

La cebada se cultiva en Guanajuato *Hordeum Vulgare L* (AIEG 2013) así como en los valles altos de México, que incluyen los estados de Tlaxcala (Calderón 2015), Puebla , Hidalgo y el Estado de México (INIFAP 2010), por otra parte, se han realizado estudios para revisar el rendimiento y la calidad de la cebada de dos hileras *Hordeum distichum L*, en el municipio de Villa de Tezontepec, en el Estado de Hidalgo (Navarrete 2015).

2.11 El Frijol

El frijol es conocido por su nombre científico *Phaseolus vulgaris* del Reino Plantae, División *Magnoliophyta*, Clase *Magnoliopsida*, Orden *Fabales*, de la Familia *Fabaceae*, de Género *Phaseolus L.*, 1753 y de la Especie *vulgaris L.* (CONABIO 2010). México es el 6° productor de frijol donde su rendimiento promedio es de 0.67 ton/ha similar al rendimiento promedio mundial de 0.72 ton/ha.

En México, el frijol ocupa el tercer lugar como cultivo de mayor importancia después del maíz de grano y el sorgo grano. Los principales productores de frijol en México son Zacatecas, Sinaloa, Durango y Chiapas (Figura 12) (Sagarpa-Firco, 2009).



Figura 11: Planta de frijol.
Fuente ASOPROL 2009



Figura 12: Producción de frijol en México.

Fuente Sagarpa-Firco, 2009

Debido a las condiciones climáticas hay una gran variación con respecto a la producción ya que dichas condiciones pueden afectar o beneficiar al cultivo; en el año 2014 se cosecharon 1.68 millones de hectáreas de frijol. En los años 2012 y 2013 la cosecha de frijol tuvo una recuperación ya que en el 2011 los estados productores tuvieron sequía y para el año 2014 tuvo una reducción anual de 4.2 por ciento (FIRA 2015).

En el año 2016 la producción de frijol fue de 1,088,766.79 toneladas, de las cuales la superficie sembrada fue de 1,632,150.47 hectáreas y la superficie cosechada fue de 1,575,988.89 hectáreas (SIAP 2017).

2.11.1 Producción en México

En México hay cinco tipos de frijol que generalmente se siembran en el noroeste: los frijoles claros; en el norte: el frijol pinto; en el sur: el frijol negro y en el centro: el flor de mayo y flor de junio. En un estudio realizado se encontraron 75 poblaciones nativas de frijol colectadas por 45 agricultores del estado de México, 4 de Morelos, 10 de Guerrero, 15 de Oaxaca y cinco de Tlaxcala. El frijol que se cultiva en estas regiones se basa en sistemas tradicionales en asociación con maíz frijol o calabaza (FIRA, 2015).

2.12 Quema de residuos agrícolas.

En diversos países del mundo la quema de residuos agrícolas y maleza continúa siendo la forma más económica y fácil de deshacerse de este tipo de residuos. Generalmente este tipo de quemas se realizan a cielo abierto para así poder eliminar los restos de los desechos de las cosechas anteriores, y dejar preparada y “limpia” la zona de cultivo para la nueva cosecha (CCA 2014).

La quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos incluidos los residuos agrícolas, produce el 40% del CO₂, 32% del CO, 20% de las partículas y 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) emitidos al ambiente a escala mundial (AIDA, 2015).

Se debe considerar que este tipo de actividades son preocupantes debido a:

- El humo de las quemas agrícolas que se libera a cerca del suelo en áreas generalmente pobladas, lo que conlleva a una exposición directa y elevada a los contaminantes atmosféricos por parte de la población aledaña.
- Las quemas se realizan en temporadas específicas y pueden dar lugar a concentraciones muy elevadas de contaminantes.
- Se realizan generalmente en áreas grandes por lo que es difícil estimar la cantidad de emisiones y contaminantes que se están generando por este tipo de actividades.
- Se utilizan diversos tipos de combustibles y las condiciones de combustión suelen variar dependiendo de la situación climática del momento.
- Contribuyen al cambio climático, ya que entre los compuestos emitidos se encuentran GEI y contaminantes climáticos de vida corta, como el carbono negro.

2.13 Factores de emisión

En general las emisiones de biomasa proceden de diversos tipos de quemas, sin embargo este tipo de información no es fácil de recopilar debido a que hay una

gran variedad de publicaciones, con distintas metodologías y se reportan en diversas unidades y diferentes sistemas de referencia (Andreae y Merlet, 2001).

Los primeros documentos sobre la quema de biomasa datan en los años setenta cuando se realizaron las primeras estimaciones pirogénicas, entonces se mencionó que la quema de biomasa podía competir con el uso de combustibles fósiles en la emisión de contaminantes atmosféricos y otras fuentes de contaminación (Eagan et al., 1974; Crutzen et al., 1979).

Puesto que la quema de residuos y productos agrícolas son generadoras de grandes cantidades de contaminantes climáticos que degradan la calidad del aire, se pretende contar con estudios que puedan ayudar a estimar los factores de emisión emitidos por dichas prácticas en México.

Para el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2006), un factor de emisión es el coeficiente que relaciona los datos de actividad con la cantidad del compuesto químico que constituye la fuente de las últimas emisiones. Por consiguiente podemos decir que un factor de emisión es el valor que representa la relación que hay entre la cantidad de un determinado contaminante que se emite a la atmósfera relacionada a la emisión de dicho contaminante por diversos procesos.

2.14 Justificación

Los factores de emisión son utilizados para la estimación de los inventarios de emisión. Para que sean más precisos, es importante determinarlos de manera local, especificando si se incluye algún equipo de control determinado, así como las condiciones en las que se lleva a cabo la actividad. La determinación por lo que el determinar los FE debidos a la quema de residuos de tres cultivos importantes en México, contribuirá a un mejor desarrollo de los inventarios de emisión mexicanos.

2.15 Objetivo General

Determinar los factores de emisión de carbono negro (CN) o elemental (CE), metano (CH_4) monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} que se están generando y emitiendo a la atmósfera por la quema de los desechos agrícolas después del tiempo de cosecha para la especie de algodón (*Gossypium*), cebada (*Hordeum vulgare*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*).

Objetivos Específicos

- Muestrear partículas con un diámetro igual o menor a 10 micras (μm) PM_{10} , partículas finas con un diámetro igual o menor a 2.5 micras (μm) $\text{PM}_{2.5}$ y los gases de combustión dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), así como el Carbono negro y elemental de la quema de residuos agrícolas por medio de un análisis isocinético,
- Determinar el factor de emisión de partículas gruesas (PM_{10}) y finas ($\text{PM}_{2.5}$) generadas en la quema de residuos agrícolas.
- Determinar las concentraciones de los gases de combustión de CH_4 , CO, CO_2 generados en la quema de residuos agrícolas.
- Estimar las emisiones de carbono negro o elemental por la quema de los residuos de los cultivos mencionados.

III. METODOLOGÍA

3.1 Recolección de residuos

Se recolectaron los residuos de algodón *Gossypium hirsutum* en los estados de Baja California, Chihuahua y Sonora.

Los residuos de cebada *Hordeum distichum* L. se recolectaron en los estados Hidalgo, Guanajuato y Tlaxcala.

Los residuos de frijol *Phaseolus vulgaris* se recolectaron en los estados de Chiapas, Puebla y Zacatecas.

3.2 Análisis fisicoquímicos de los residuos

1. Se determinó el porcentaje de Humedad de acuerdo al método “Solid biofuels- Determination of moisture content- Oven dry method- Part 1: Total Moisture- Reference Method.”
2. Se determinó la composición elemental de los residuos en un cromatógrafo Perkin Elmer PE 2400 equipado con un detector de conductividad térmica (TCD, por sus siglas en inglés). El TCD compara la conductividad térmica de dos flujos de gases: el gas portador puro (de referencia) y el gas de muestra (CH_4), a través de los cambios registrados en una resistencia eléctrica.

3.3 Desarrollo experimental de quema e instrumentación

1. Se montó un Tren de Muestra de acuerdo al método 201 a de la EPA para la determinación de partículas con la norma 40 CFR 60 Ap. A. en un quemador construido en la UAM-Azcapotzalco (Figura 13).



Figura 13. Equipo Apex para el muestreo isocinético de partículas en el quemador de residuos de la UAM-Azcapotzalco

2. Se establecieron condiciones de trabajo para cada una de las especies relacionadas con el tiempo de quemado y la masa de las especies.
 - Se colocaron 300 g de algodón y se estableció un tiempo de quema de 6 minutos, se colocó en una malla y se cortaron en trozos pequeños de manera casi homogénea para que se consumieran más fácilmente, como se muestra en la figura 14.



Figura 14. Quema de residuos de algodón en el quemador de UAM-Azcapotzalco

- Se colocaron 700g de cebada y se realizó la quema por 4 minutos, colocando los residuos sobre el quemador de manera casi uniforme como se muestra en la figura 15.



Figura 15. Residuos de cebada que se quemaron

- Se colocaron 500g de frijol y se realizó la quema por 4 minutos, se colocó sobre el quemador de manera casi uniforme como se muestra en la figura 16.



Figura 16. Quema de residuos de frijol

3. Se realizaron los análisis de gases utilizando una celda electroquímica como se muestra en la figura 17 y se utilizó un ciclón de PM_{10} y uno de $PM_{2.5}$ para la colecta de partículas.



Figura 17. Celda electroquímica en chimenea

4. Se pesaron las cenizas de los residuos quemados.
5. Se pesaron los filtros de cada una de las quemas
6. Se determinaron las concentraciones de carbono orgánico y elemental de los filtros en cada una de las quemas.
7. Se determinaron los factores de emisión de CN, CH₄, CO, CO₂, PM_{2.5} y PM₁₀ que se generaron durante cada una de las quemas.

La figura 18 muestra el diagrama de flujo de los experimentos realizados.

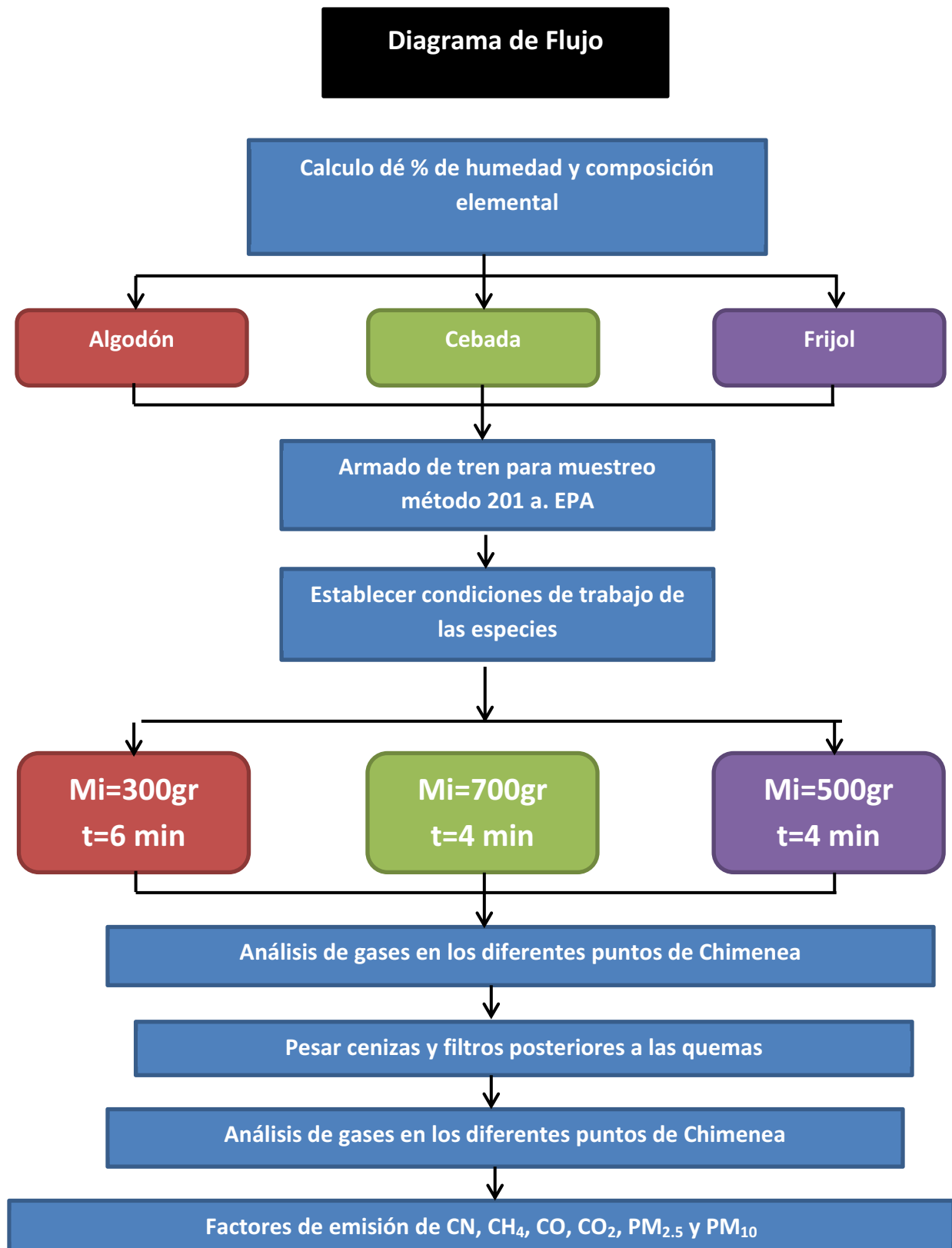


Figura 13: Diagrama de flujo del proyecto

3.4 Cámara de combustión

Se diseñó y construyó un equipo que pudiera simular la quema de residuos agrícolas a cielo abierto de acuerdo a las bases de la tecnología propuesta por Neto (2011), en la cual se utiliza un quemador que es colocado sobre una balanza que registra cambios de masa, además en el cual se colocan los residuos.

En la parte superior del quemador se coloca una estructura compuesta por una campana por la que salen los humos generados durante la combustión que se conducen a través de una chimenea de 2.8 metros de altura y 20 cm de diámetro que contiene un puerto de muestreo a la altura de 1.8 m. (figura 19), donde se introduce una sonda de muestreo que conduce a un ciclón para coleccionar partículas PM_{10} o $PM_{2.5}$ y se introduce un analizador de gases de CO_2 , CO , O_2 , en tanto que la determinación de metano se realizó por cromatografía de gases.

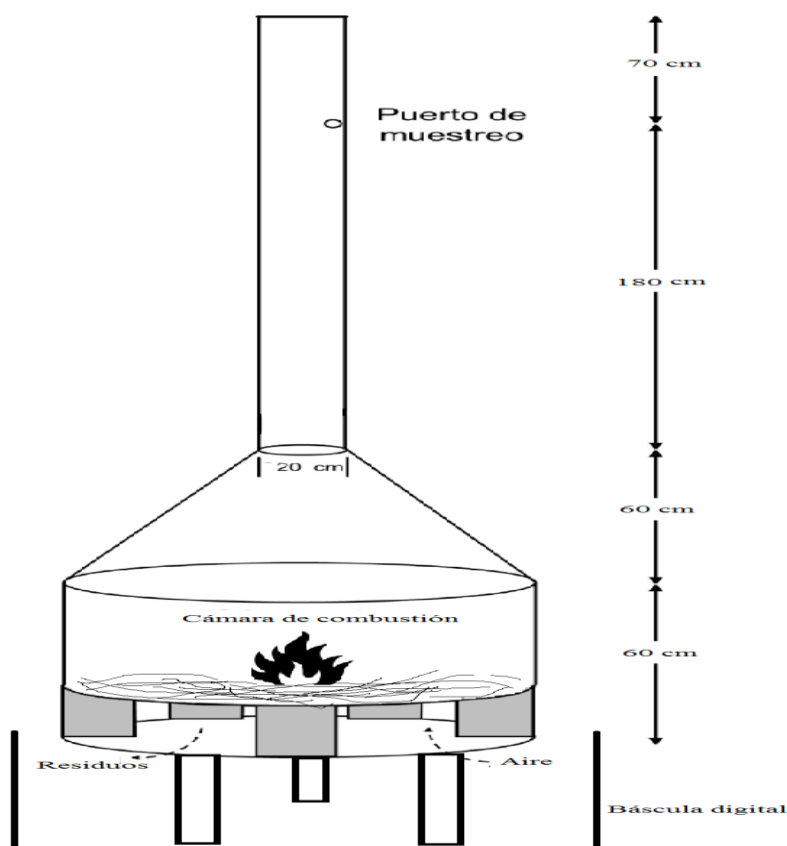


Figura 14: Diseño de equipo para simular quemas a cielo abierto

Se utilizó el equipo de muestreo isocinético Apex XC500 mostrado en la figura 20.



Figura 15: Equipo isocinético Apex XC 500

Fuente: Apex Instruments

El equipo está constituido por diversos dispositivos:

Medidor de flujo de gas: el SK25EM para prueba de fugas fácil de leer, baja caída de presión, tasa de 42 LPM a 15mm H₂O, capacidad máxima aproximada de 70 LPM. Capacidad Totalizador 9999.9999 metros cúbicos, resolución 0,01 litros.

Manómetro: Manómetro Dual inclinado/Vertical para determinar la velocidad y caudal de la muestra. Rango Inclinado de H₂O 0-26mm con incrementos de 2 mm. Rango vertical de H₂O 26-250mm con incrementos 2mm. Fabricado de acrílico sólido, con una precisión de +/- 1%. con un conveniente cromo latón chapado autosellante, conectado con Viton® O-Rings. Se suministra con tapones de plástico para sello secundario positivo.

Pantalla de temperatura: Termómetro digital en el Panel de montaje, rojo brillante, pantalla LED, carcasa de plástico de 1/8 DIN. Rango de - 105 ° C a 1372 °C, con selector de 7 canales por separado.

Controladores de temperatura para la sonda y el horno: 1/32 pantalla roja LED DIN brillante, que indica los controladores de temperatura con un relé de estado sólido de 25 amperios separado, autoajuste, toma tipo K estándar para la entrada.

Medidor de vacío: Escala dual de Indicador vacío 0-30 Hg/0-100kPa

Conexiones de la bomba de muestreo: Entrada de la muestra: ½ "de acero inoxidable de conexión rápida; Líneas Pitot: 1/4 ", (3/8" opcional) Conexión rápida de Acero inoxidable; Eléctrico: 4 conductores Conector circular; Termopares tipo K: 6 entradas, tamaño estándar.

Encendido: 240V/50Hz; 120V/60Hz opcional.

Dimensiones: 23 " Altura x 21" Ancho x 12 " Profundidad (58cm x 53cm x 30cm)
19 "Panel frontal extraíble

Peso: 40lbs (18kg)

Para determinar la concentración de los gases se utilizó un analizador Fyrite INSIGHT Plus de Bacharach (Figura 21).



Figura 16: Analizador de gases

El analizador consta de varios sensores electromecánicos reemplazables en campo (O_2 y B-SMART CO), sensor de O_2 de larga duración opcional, sensor de presión, medición de temperatura del gas de combustión. Suministro eléctrico: Cable USB, baterías alcalinas AA, Advertencia de batería baja.

Características de la prueba: Los resultados de las pruebas se pueden almacenar, recuperar, exhibir e imprimir. Tiene función de calibración segura, característica de apagado automático con característica de purga del sensor, las pantallas gráficas muestran las funciones gráficas de tendencias, de barra y de zonas calientes, cuenta con menús de estado y diagnóstico, ingreso manual de valores, función de recordatorio de calibración, formatos de pantalla personalizados, función de acercamiento, función de rango de impresión, CO ambiente.

Personalizaciones del usuario: Cálculos de combustión de América del Norte y de Sievert, Interfaz multilingüe, Funciones de puesta en cero automática/manual para el sensor de CO Logotipo personalizado en materiales impresos. Información personalizada del, Diez conjuntos de ID de prueba para personalizar los materiales impresos, Selección de unidad de temperatura y presión.

Hardware: Conjunto de sonda/manguera para transporte de gas e ingreso de temperatura Bomba de muestra para suministrar una entrega de muestra de gas, LCD gráfico a color con luz de fondo, Estuche portátil rígido, Estampado de fecha y hora de 100 resultados de las pruebas o USB 2.0, para interfaz y comunicaciones de PC

Interfaz de PC: Cable USB, Software de usuario de, Actualizaciones, configuración del instrumento y descarga de los resultados de las pruebas

3.5 Caracterización de las especies

En este trabajo de investigación se utilizó el método Europeo "Solid biofuels-Determination of moisture content- Oven dry method- Part 1: Total Moisture-

Reference Method.” Para calcular el porcentaje de humedad de cada una de las especies previo a la quema, realizado de la siguiente manera:

- Se tomaron pequeñas porciones de cada una de las especies y se molieron de forma uniforme de tal manera que fuera lo más homogénea posible.
- Se colocaron en una estufa 3 charolas para cada especie y una charola extra para utilizar un punto de referencia durante un periodo de 12 horas a 105°C.
- Después en una balanza analítica se pesaron cada una de las charolas, después se agrego 1g ± 0.1g del producto de cada especie sin agregar nada a la charola de referencia.
- Se colocaron nuevamente cada una de las charolas en la estufa por 12hrs y 105°C.
- Se pesaron nuevamente cada una de las charolas incluyendo la de referencia para realizar los cálculos del % de humedad.
- Los cálculos se realizaron de acuerdo a la Siguiende formula.

$$\%HUMEDAD = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{(m_2 - m_1)} \times 100$$

En donde:

m1= Peso de la bandeja vacía (g)

m2= Peso de la bandeja más el residuo antes del secado (g)

m3= Peso de la bandeja más el residuo después del secado (g)

m4= Peso de la bandeja de referencia antes del secado (g)

m5= Peso de la bandeja de referencia después del secado (g).

3.6 Muestreo Isocinético

En el muestreo Isocinético se toma una muestra representativa de la emisión que nos permite determinar la concentración del contaminante y el flujo del gas

portador a la misma velocidad de flujo tanto para la emisión como para el equipo, (Echeverri, 2006).

- Ecuación de continuidad.

Para el cálculo de la velocidad a la entrada de la boquilla se utilizó la fórmula de la ecuación de continuidad.

$$Q_n = A_n v_n$$

En donde:

Q_n = gasto en la boquilla pies³/min, m³/seg

A_n = área trasversal de la boquilla pies², m²

V_n = velocidad en la boquilla pies/min, m/s

Después se calculó el gasto de la boquilla por medio de la siguiente ecuación.

$$Q_n = K_m \sqrt{\frac{T_m \Delta H}{P_m M_m} \frac{P_m T_s}{P_s T_m} \left(\frac{1 - B_{wm}}{1 - B_{ws}} \right)}$$

En donde:

Q_n = gasto en la boquilla pies³/min, m³/seg

Q_m = flujo en el medidor pies³/min, m³/seg

K_m = constante del gasómetro

T_m = temperatura del medidor K, R

ΔH = caída de presión en la placa orificio pulg H₂O, mm H₂O

P_m = presión en el medidor pulg Hg, mm Hg

M_m = peso molecular lb/lbmol, g/g mol

B_{wm} = vapor de agua en el flujo de gases en fracción

B_{ws} = contenido de humedad en fracción

T_s = temperatura de chimenea, K, R

P_s = presión estática del conducto mm Hg (pulg Hg)

Este muestreo se realiza de acuerdo al método de tren de la norma 40 CFR 60 Ap. A., que es el método 201 a de la EPA para la determinación de partículas. El método de tren consta de una sonda de muestreo un filtro ubicado en una caja calentada, dispositivos de impacto, una bomba auxiliar, contador de gas seco y manómetro que sirven para medir los cambios de presión.

Se recolecta la muestra con una sonda que pasa a través de un ciclón donde se quedan las partículas más grandes posteriormente este pasa a través de un filtro donde queda atrapado las partículas más finas, posteriormente el gas que sigue circulando pasa a través de los dispositivos de impacto que deben estar sumergidos en hielo para remover la humedad del flujo de gas. Se mide la tasa de flujo del gas con el contador al mismo tiempo que la bomba y manómetros son utilizados para ajustar las condiciones isocinéticas en el tiempo que puede durar la prueba. A la hora de realizar un muestreo isocinético la velocidad de los gases que entran por la punta de la sonda del muestreador debe igualar exactamente la velocidad del gas en el punto de muestreo en la corriente para que el gas y las partículas fluyan sin interferencias en la sonda del aparato muestreador permitiéndonos recoger una muestra exacta y hacer cálculos más exactos de la masa de partículas arrojadas a la atmosfera (Figura 22).

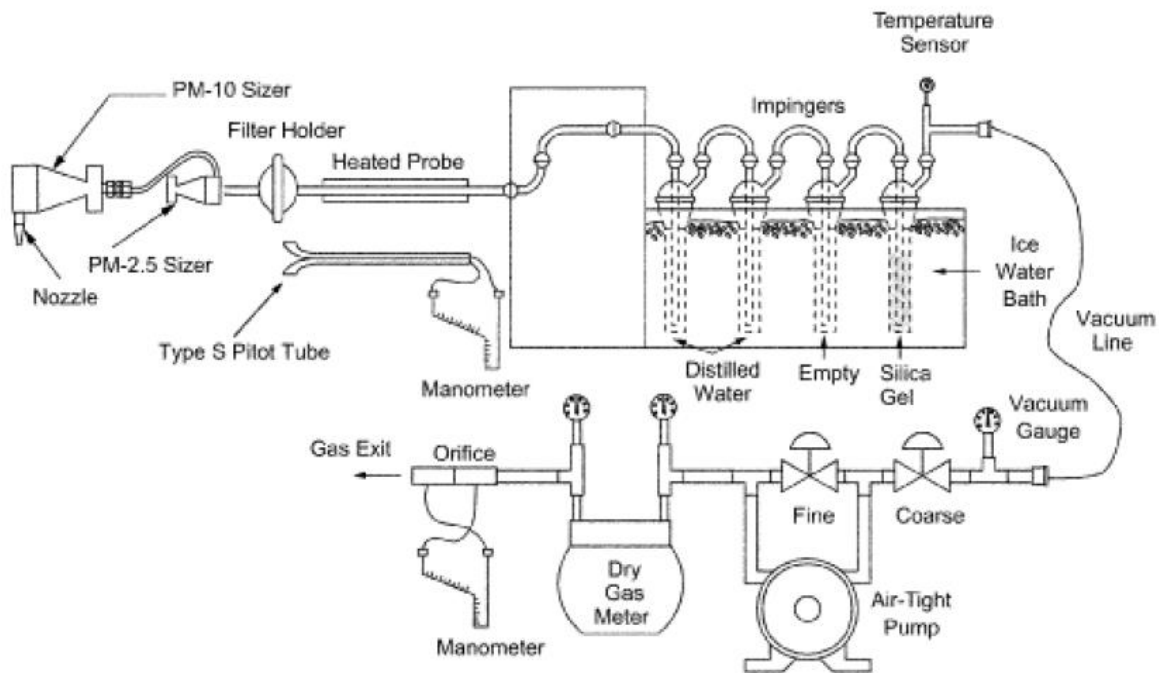


Figura 17: Tren de muestreo isocinético para partículas

Para calcular el porcentaje de isocinetismo se utilizó la siguiente ecuación.

$$\% \text{ isocinetismo} = 100 \frac{V_n}{V_s}$$

Dónde:

V_n = Velocidad de toma de muestra

V_s = Velocidad de gases en chimenea

Se debe seleccionar un sitio de medición dentro de la chimenea donde se conoce la dirección en la que fluye la corriente para así lograr una buena medición representativa de las emisiones de los contaminantes de una fuente específica. Este método se utiliza en chimeneas cuando las corrientes de gas fluyen en una dirección conocida.

Se debe de tomar en cuenta que este método no puede ser utilizado cuando:

- El flujo es ciclónico o turbulento
- O cuando el sitio de medición tiene menos de dos diámetros de chimenea o ducto corriente abajo o menos de medio diámetro corriente arriba después de una perturbación.

Si un muestreo no es isocinético y las velocidades en la muestra difieren en la salida de la chimenea y entrada de la sonda los resultados de las pruebas no cuantifican exactamente las concentraciones de gases y partículas (Dinger 2010).

En la figura 23 se muestran tres tipos de muestreos diferentes. La figura A tiene una prueba isocinética donde la velocidad adentro de la sonda muestreadora sirve para la velocidad en la corriente de gas de escape, solo cuando la velocidad del gas de escape y la velocidad en la entrada de la sonda son idénticas (Isocinética) se consigue una muestra que consigue resultados más exactos.

En la figura B se muestra una prueba en la cual la velocidad dentro de la sonda es menor de la velocidad de salida, lo cual sucede si hay una succión insuficiente.

En la figura C se muestra una prueba en la cual la velocidad dentro de la sonda es mayor que la velocidad de la corriente de gas de salida.

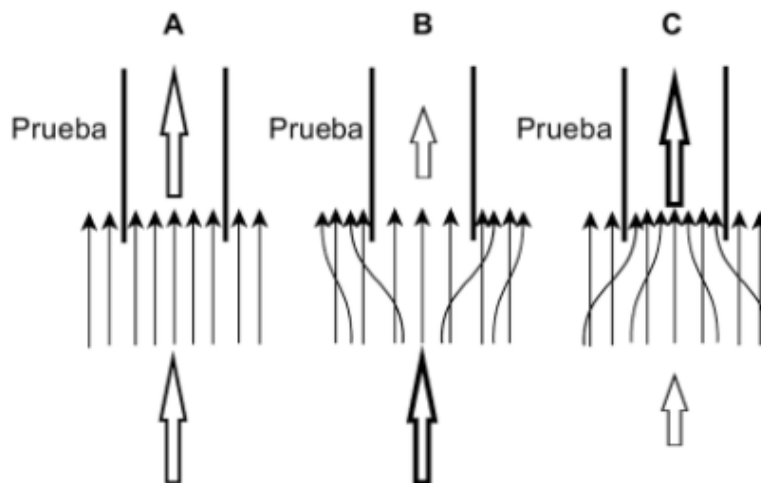


Figura 18: Ejemplos de muestreo en chimenea
(A) Iso Cinético,
(B) velocidad demasiado baja de prueba,
(C) velocidad demasiado alta de prueba.

Las flechas grandes representan las velocidades de las corrientes en las sondas y en los tubos de escape y las flechas sólidas representan las partículas gruesas (González, 2016).

Con base en la norma Mexicana de contaminación atmosférica (NMX-AA-009-SCFI- 1993) se realizó el cálculo de la velocidad de los gases en fuentes fijas. La determinación de flujo de gases en un conducto es por medio del tubo de Pitot, que se basa en el método 1 de la EPA. La determinación del punto y velocidad de toma de muestra para fuentes fijas es con el método 2 de la EPA.

Para calcular la velocidad se utiliza un tubo Pitot (SCFI, 1993), con el que se mide la presión velocidad y con el cual podremos conocer la velocidad de circulación de un fluido en un conducto. Este pequeño tubo tiene la entrada orientada en contra del sentido de la corriente del fluido. Debido a que está en un punto de estancamiento la velocidad del fluido en la entrada del tubo se hace nula y hace que la energía cinética se convierta en energía de presión, lo que da lugar a un aumento de presión dentro del tubo de Pitot (González, 2016).

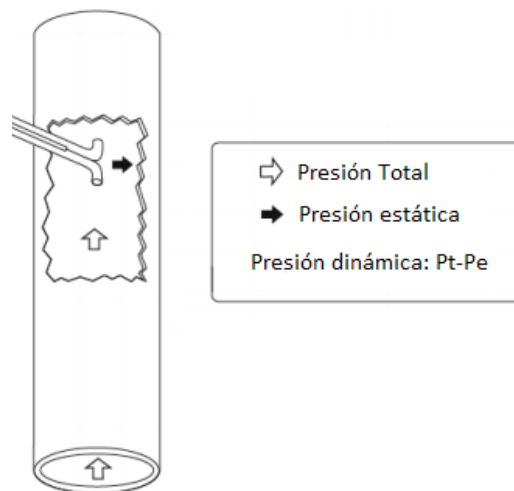


Figura 19: Tubo Pitot tipo S.
FUENTE: USEPA, 1995.

Para tener un buen punto de medición se tiene que tener una distancia equivalente de ocho (8) diámetros corriente abajo después de una perturbación y dos (2) diámetros corriente arriba debido que en este punto se encuentra un flujo laminar. De otra manera se localizará el sitio de medición por lo menos a dos diámetros de la chimenea corriente abajo después de una perturbación y así poder aumentar el número de puntos de muestreo en la sección transversal y tener muestras más representativas.

Generalmente el muestreo es en multipuntos a lo largo del conducto seleccionado. El número de puntos depende del área seccional de la chimenea y la distancia donde el flujo es laminar. Para que una muestra sea representativa del total de flujo depende de la homogeneidad de la velocidad del gas dentro del plano de muestreo, se necesitan puntos suficientes para el perfil de velocidades y que se garantice que se mantengan las condiciones de isocinetismo durante el muestreo (González, 2016).

Para localizar los puntos de muestreo nos basamos en la norma mexicana NMX-AA-009-SCFI-1993 con base en la tabla 4.

Número de punto transversal en el diámetro	Número de puntos transversales en el diámetro											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14.6	6.7	4.4	3.2	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1
2	85.4	25.0	14.6	10.5	8.2	6.7	5.7	4.9	4.4	3.9	3.5	3.2
3		75.0	29.6	19.4	14.6	11.8	9.9	8.5	7.5	6.7	6.0	5.5
4		93.3	70.4	32.3	22.6	17.7	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7	7.9
5			85.4	67.7	34.2	25.0	20.1	16.9	14.6	12.9	11.6	10.5
6			95.6	80.6	65.8	35.6	26.9	22.0	18.8	16.5	14.6	13.2
7				89.5	77.4	64.4	36.6	28.3	23.6	20.4	18.0	16.1
8				96.8	85.4	75.0	63.4	37.5	29.6	25.0	21.8	19.4
9					91.8	82.3	73.1	62.5	38.2	30.6	26.2	23.0

10	97.4	88.2	79.9	71.7	61.8	38.8	31.5	27.2
11	93.3	85.4	78.0	70.4	61.2	39.3	32.3	
12	97.9	90.1	83.1	76.4	69.4	60.7	39.8	
13		94.3	87.5	81.2	75.0	68.5	60.2	
14		98.2	91.5	85.4	79.6	73.8	67.7	
15			95.1	89.1	83.5	78.2	72.8	
16			98.4	92.5	87.1	82.0	77.0	
17				95.6	90.3	85.4	80.6	
18				98.6	93.3	88.4	83.9	
19					96.1	91.3	86.8	
20					98.7	94.0	89.5	
21						96.5	29.1	
22						98.9	94.5	
23							96.8	
24							99.9	

Tabla 4: Localización de puntos transversales en la chimenea

3.7 Análisis de carbono orgánico y elemental

Previo a la colecta isocinética de partículas, se precalcinaron a 500°C y se acondicionaron los filtros de cuarzo, los cuales se pesaron antes y después del muestreo.

La concentración de las concentraciones de CO y CE se determinaron con un equipo Sunset Lab por el método termoóptico TOT-NIOSH (figura 25), en el que una fracción de los filtros de aproximadamente 1.5 cm² con partículas se someten a oxidación a 650°C sin oxígeno, posteriormente se realiza otra combustión en atmósfera de helio donde se volatiliza completamente el carbono orgánico. Al final la temperatura se incrementa a 750-800 °C para oxidar el carbono elemental.



Figura 205: Analizador EC/OC Sunset Lab

3.8 Determinación de factores de emisión de los distintos contaminantes

La concentración de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se calculó con la siguiente ecuación:

$$E_{PM_{2.5}, PM_{10}} = \frac{m_{PM_{2.5}, PM_{10}}}{v_m} * v_T$$

Donde:

$E_{PM_{2.5}, PM_{10}}$ = Cantidad de partículas emitidas (g)

$m_{PM_{2.5}, PM_{10}}$ = Cantidad de partículas colectadas en el medio filtrante (g)

v_m = Volumen muestreado (ft^3)

v = Volumen total de los gases en la combustión (ft^3).

Se determinó la incertidumbre combinada de las diferentes variables en la medición de cada contaminante (Ejemplo para el carbono negro).

$$u_c(CN) = \sqrt{u_r(v_m)^2 + u_r(v_t)^2 + u_r(CN)^2 + u_r(m_r)^2}$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Composición elemental de los residuos

La tabla 5 presenta la composición elemental de los residuos de los cultivos investigados en los que se observa que las composiciones son similares, aunque la mayor cantidad de carbono lo presentan los residuos de frijol.

Especie	%C	%H	%O	%N	%S
algodón	39.63±0.02	6.34±0.09	51.09±0.46	2.04±0.5	0.11±0.11
cebada	40.59±0.41	6.19±0.25	52±0.09	1.09±0.14	0.04±0.38
frijol	42.94±0.11	6.68±0.08	49.27±0.18	1.12±0.14	0.24±0.2

Tabla 5: Análisis elemental de los residuos

4.2 Factores de Emisión obtenidos para los distintos residuos

En la tabla 6 se muestran los factores de emisión de PM₁₀ y de CN y OC para ese tamaño de partícula durante la quema de residuos de algodón.

	FE PM ₁₀ (g PM10/Kg)	FE CN (g CN/Kg)	FE OC (g OC/Kg)
Promedio (g/kg)	13.37	0.47	7.72
Desv. Est (g/kg)	4.64	0.09	4.24
n	10	10	10
Incertidumbre combinada (%)	14.23	9.34	21.04

Tabla 6: Factores de emisión de PM10 para residuos de algodón

En la tabla 7 se muestran los factores de emisión obtenidos durante la quema de residuos de algodón de CN y OC para PM_{2.5}.

	FE PM _{2.5} (g PM10/Kg)	FE CN (g CN/Kg)	FE OC (g OC/Kg)
Promedio (g/kg)	8.22	0.41	3.76
Desv. Est (g/kg)	1.52	0.15	1.36
n	12	12	12
Incertidumbre combinada (%)	6.61	11.70	10.71

Tabla 7: Factores de emisión de PM2.5 para residuos de algodón

Los factores de emisión obtenidos de CN en PM₁₀ y PM_{2.5} son estadísticamente iguales, sin embargo los de PM₁₀ y PM_{2.5} son estadísticamente diferentes ($\alpha=0.05$), al igual que los de OC para los dos tamaños de partícula. Solamente el CN en PM_{2.5} mostró una distribución no normal. La prueba de Mann-Whitney mostró que los FE de los dos tamaños de partícula, así como los FE de OC en los dos tamaños de partícula, son estadísticamente diferentes, mientras que los FE de CN en los dos tamaños de partícula no tienen diferencia significativa.

En la tabla 8 se muestran los factores de emisión de gases (CO, CO₂ y CH₄) obtenidos en la quema de residuos de algodón, donde todos presentaron distribución normal.

	FE CO (g CO/Kg)	FE CO ₂ (g CO ₂ /Kg)	FE CH ₄ (g CH ₄ /Kg)
Promedio (g/kg)	75.81	1690.41	2.66
Desv. Est (g/kg)	11.36	115.50	0.20
n	22	22	22
Incertidumbre combinada (%)	5.41	4.47	3.28

Tabla 8: Factores de emisión de gases para residuos de algodón

En la tabla 9 se muestran los factores de emisión obtenidos de CN y OC para PM₁₀, obtenidos durante la quema de residuos de cebada.

	FE PM10 (g PM10/Kg)	FE CN (g CN/Kg)	FE OC (g OC/Kg)
Promedio (g/kg)	1.77	0.24	0.54
Desv. Est (g/kg)	0.47	0.07	0.33
n	9	9	9
Incertidumbre combinada (%)	10.81	11.89	23.08

Tabla 9: Factores de emisión de PM10 para residuos de cebada

En la tabla 10 se muestran los factores de emisión obtenidos de CN y OC para PM_{2.5}, obtenidos durante la quema de residuos de cebada.

	FE PM _{2.5} (g PM ₁₀ /Kg)	FE CN (g CN/Kg)	FE OC (g OC/Kg)
Promedio (g/kg)	1.19	0.22	0.33
Desv. Est (g/kg)	0.33	0.08	0.15
n	11	11	11
Incertidumbre combinada (%)	8.35	12.49	15.04

Tabla 10: Factores de emisión de PM_{2.5} para residuos de cebada

Los factores de emisión de CN y OC en PM₁₀ y PM_{2.5} son estadísticamente iguales, así como las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}. Lo anterior implica que no hay diferencias por el tamaño de partícula.

En la tabla 11 se muestran los factores de emisión de gases (CO, CO₂ y CH₄) obtenidos en la quema de residuos de cebada. Todos presentaron distribución normal.

	FE CO (g CO/Kg)	FE CO ₂ (g CO ₂ /Kg)	FE CH ₄ (g CH ₄ /Kg)
Promedio (g/kg)	33.31	1692.64	1.95
Desv. Est (g/kg)	6.04	125.92	0.21
n	20	20	20
Incertidumbre combinada (%)	6.99	4.95	4.79

Tabla 11: Factores de emisión de gases para residuos de cebada

En la tabla 12 se muestran los factores de emisión obtenidos de CN y OC para PM₁₀, obtenidos durante la quema de residuos de frijol.

	FE PM ₁₀ (g PM ₁₀ /Kg)	FE CN (g CN/Kg)	FE OC (g OC/Kg)
Promedio (g/kg)	2.75	0.19	0.60
Desv. Est (g/kg)	0.57	0.04	0.28
n	10	10	10
Incertidumbre combinada (%)	6.63	5.23	14.57

Tabla 12: Factores de emisión de PM₁₀ para residuos de frijol

En la tabla 13 se muestran los factores de emisión obtenidos de CN y OC para PM_{2.5}, obtenidos durante la quema de residuos de cebada.

	FE PM _{2.5} (g PM10/Kg)	FE CN (g CN/Kg)	FE OC (g OC/Kg)
Promedio (g/kg)	2.24	0.19	0.50
Desv. Est (g/kg)	0.59	0.03	0.30
n	10	10	10
Incertidumbre combinada (%)	8.61	6.07	19.08

Tabla 13. Factores de emisión de PM_{2.5} para residuos de frijol

Los factores de emisión de CN y OC en PM₁₀ y PM_{2.5} son estadísticamente iguales, así como las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5}, implicando que no existen diferencias por el tamaño de partícula.

En la tabla 14 se muestran los factores de emisión de gases (CO, CO₂ y CH₄) obtenidos en la quema de residuos de frijol. Todos presentaron distribución normal.

	FE CO (g CO/Kg)	FE CO ₂ (g CO ₂ /Kg)	FE CH ₄ (g CH ₄ /Kg)
Promedio (g/kg)	65.92	1229.62	5.32
Desv. Est (g/kg)	6.91	85.28	0.26
n	20	20	20
Incertidumbre combinada (%)	5.30	3.12	2.70

Tabla 14: Factores de emisión de gases para residuos de frijol

En los cultivos analizados se observa que los FE de PM₁₀, PM_{2.5}, CN, OC, CO₂, CO y CH₄ difieren entre los 3 residuos evaluados. La quema de residuos de algodón presentó los valores más altos de FE para las especies contaminantes en forma de partícula, siendo hasta 6 y 5 veces más altas las PM₁₀ y PM_{2.5} que los FE para la cebada y el frijol respectivamente (figura 25), lo cual quizá se debe a la presencia de pequeños troncos en los rastrojos quemados, los cuales tardaron más tiempo en quemarse; mientras que en el caso de los factores de emisión de CN también el algodón presentó valores más de 2 veces más altos que la cebada

y el frijol y alrededor de 10 veces más altos los valores de OC que la cebada y el frijol, para los dos tamaños de partícula (figura 26).

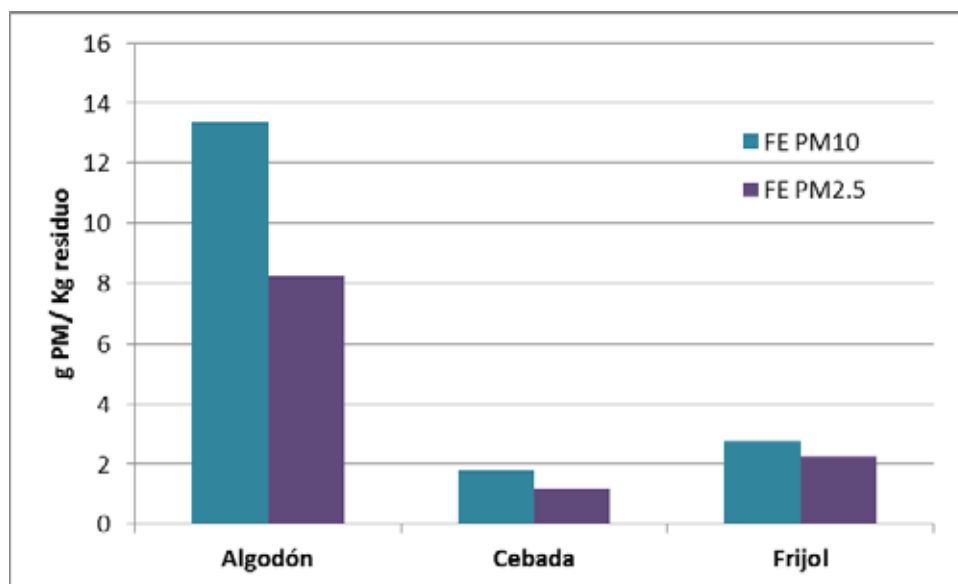


Figura 216: Comparación de los FE de partículas por la quema de los 3 residuos

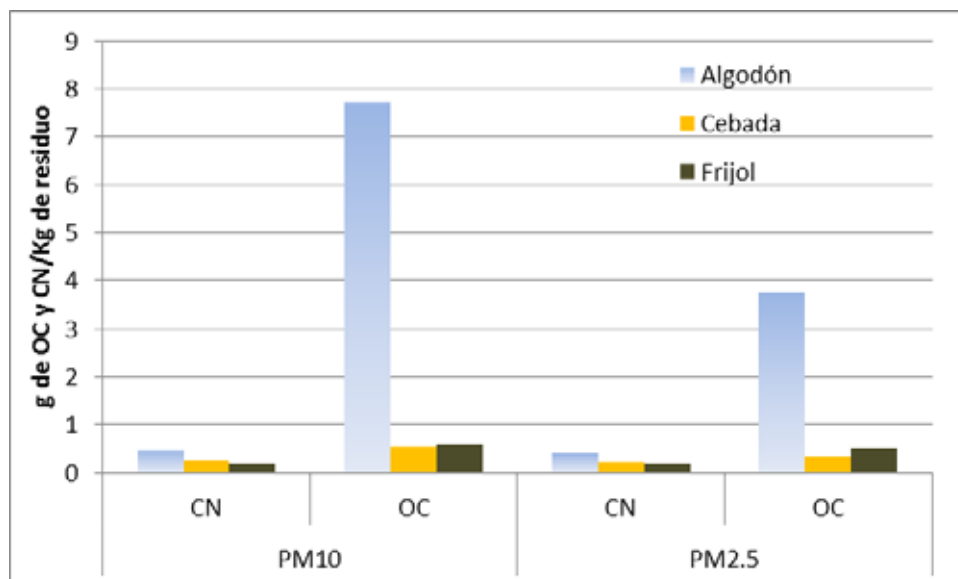


Figura 227: Comparación de los FE de CN y OC por la quema de los 3 residuos

En cuanto a los gases, las emisiones de CO fueron 2.3 y 1.2 veces más altas para el algodón que la cebada y el frijol respectivamente, en tanto que las emisiones de metano por la quema de los residuos de frijol fue 2 y 2.7 veces mayor que las de los residuos de algodón y cebada (figura 28). La quema de residuos de algodón y cebada presentaron casi los mismos factores de emisión de CO₂, mientras que el FE para el frijol fue alrededor de un 30% menor (figura 28).

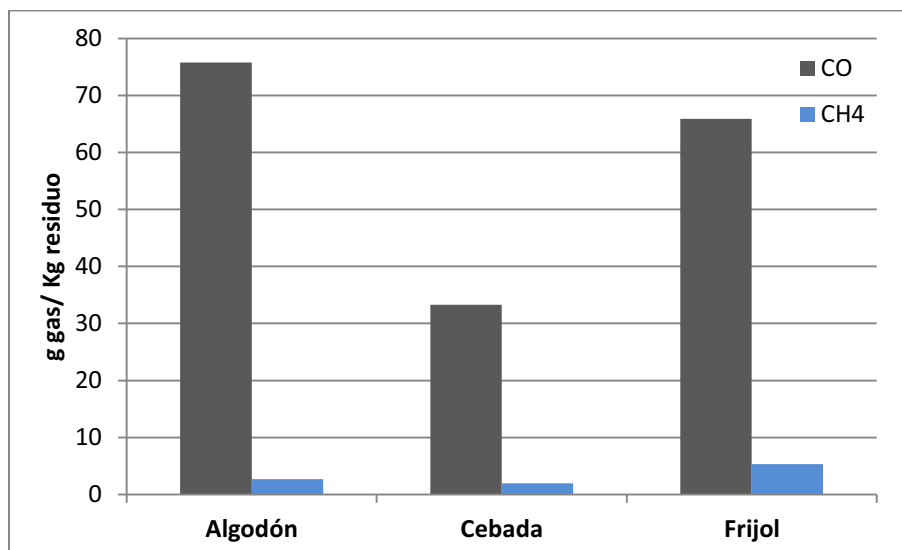


Figura 238: Comparación de los FE de partículas por la quema de los 3 residuos

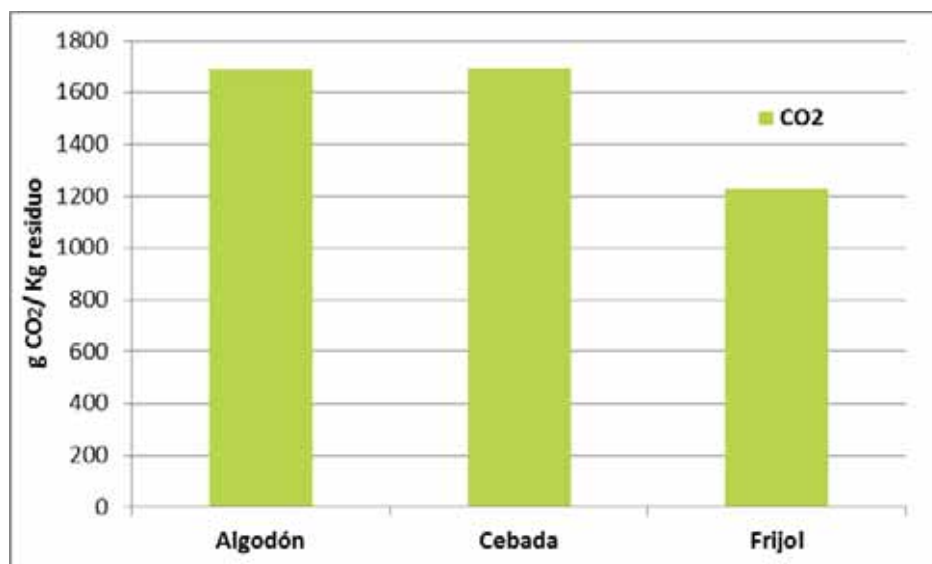


Figura 249: Comparación de los FE de partículas por la quema de los 3 residuos

En la tabla 15 se presenta la comparación de los factores de emisión obtenidos en los 3 cultivos con los que se encuentran en la literatura. Los factores de emisión del metano son similares a los publicados para la cebada y el frijol, aunque el del algodón fue mayor; mientras que en los tres casos los FE para CO₂ obtenidos en este trabajo fueron mayores, quizá por haber obtenido una mayor eficiencia. En cuanto a los factores de partículas, CN y OC, los valores fueron en ocasiones mayores y en otras menores, lo cual puede explicarse por la diferencia en las técnicas de medición involucradas.

FE g del contaminantes/kg de residuo								
PM2.5	PM _{2.5}	PM ₁₀	CN	OC	CO	CO ₂	CH ₄	Referencias
Algodón	4 ¹		0.82±0.20 ²	1.83±0.54 ²	88 ¹	1345.42±108.02 ²	0.7 ¹	1AP-42,
Otros estudios	4.53±0.95 ²				105.82±6.02 ²			2Cao,2008
Algodón	8.22±1.52	13.37±4.64	0.47±0.09PM₁₀	7.72±4.24 PM₁₀	75.81±11.36	1690.4±115.5	2.66±0.20	
Este trabajo			0.41±0.15PM_{2.5}	3.76±1.36 PM_{2.5}				
Cebada	11 ¹		0.807 ³	1.8 ³	78 ¹	983 ± 62 ³	2.2 ¹	1AP-42,
Otros estudios	5.8 ³				46.9 ± 2.1 ³		1.47 ±	3Hayashi et
							0.06 ³	al., 2014
Cebada	1.19±0.33	1.77±0.47	0.24±0.07PM₁₀	0.54±0.33PM₁₀	33.31±6.04	1692.6±125.9	1.95±0.21	
Este trabajo			0.22±0.08PM_{2.5}	0.33±0.15PM_{2.5}				
Frijol	7-22 ¹				93 ¹		5.5 ¹	¹ AP-42
Otros estudios								
Frijol	2.24±0.59	2.75±0.57	0.19±0.04PM₁₀	0.60±0.28PM₁₀	65.92±6.91	1229.62±85.28	5.32±0.26	
Este trabajo			0.19±0.03PM_{2.5}	0.50±0.30PM_{2.5}				

Tabla 15: Comparación de los factores de emisión obtenidos con los reportados
1. AP-42. Open Burning. Fifth Ed. 1992. 2. Cao et al, 2008. 3. Hayashi et al, 2014.

4.3 Cálculo de emisiones

En la tabla 16 se muestran las estimaciones de la fracción de masa seca de todos los cultivos la cual se obtuvo en función del % de humedad determinado en el laboratorio.

Cultivo	Relación residuo-cultivo ¹	Fracción materia seca	Fracción de cultivo incinerado en campo ²
Algodón	3.0	0.906	0.20
Cebada	2.3	0.903	0.20
Frijol	1.30	0.919	0.20

Tabla 16: Datos de cosecha y quema de los diferentes cultivos

1. Valdez-Vázquez, et al. 2010.

2. INECC, comunicación personal

En la tabla 17 se presentan los datos de residuos y residuos incinerados para cada cultivo y en la tabla 18 se muestran las emisiones anuales calculadas de los contaminantes para los 3 cultivos. Con respecto a la metodología del IPCC y la utilizada para estimar las emisiones en México de los gases y compuestos de efecto invernadero, se señala que el porcentaje incinerado de materia vegetal para la cebada es de cero, hasta que no se compruebe lo contrario.

Es importante mencionar que la quema de residuos agrícolas no tiene conocimiento certero ya que se cuenta con muy pocos datos de cada cultivo y en algunos casos los residuos son vendidos y/o utilizados como alimento de ganado debido a esto se utilizaron los datos reportados por el IPCC y/o los archivos del INECC, por otra parte, suelen variar las quemas entre los estados.

Cultivo	Producción (t) 2015	Relación residuo-cultivo	Fracción materia seca	Fracción de cultivo incinerado en campo	Factor de oxidación	Masa de residuos incinerados(t)
Algodón	593,439.49	3	0.906	0.2		290,462.52
Cebada	734,831.71	2.3	0.903	0.2		274,741.38
Frijol	969,146.28	1.3	0.919	0.2		208,388.35

Tabla 17: Estimación de residuos incinerados

Las emisiones más altas corresponden a la quema de residuos de algodón ya que los factores de emisión son 4 veces más altos que en la quema de residuos de frijol y 7 veces más altos que en la quema de residuos de cebada.

Cultivo	FE (g/kg de residuo)					Emisiones (Mt)				
	PM10	PM2.5	CN	CO2	CH4	PM10	PM2.5	CN	CO2	CH4
Algodón	13.37	8.22	0.47	1,609.41	2.66	0.00388	0.00239	0.00014	0.46747	0.00077
Cebada	1.77	1.19	0.24	1,692.64	1.95	0.00049	0.00033	0.00007	0.46504	0.00054
Frijol	2.75	2.24	0.19	1,229.62	5.32	0.00057	0.00047	0.00004	0.25624	0.00111

Tabla 18: Estimación de emisiones anuales de partículas y gases por la quema de residuos agrícolas

V. CONCLUSIONES

Se logró muestrear las partículas menores a 10 micras (μm) PM_{10} , y menores a 2.5 micras (μm) $\text{PM}_{2.5}$ así como los gases de combustión CO_2 , CO , CH_4 , así como el Carbono negro y elemental en cada una de las quemas de los residuos agrícolas.

Se determinaron los factores de emisión de partículas gruesas (PM_{10}) y finas ($\text{PM}_{2.5}$) que se generan durante cada una de las quemas.

Se determinaron las concentraciones de los gases de combustión de CH_4 , CO , y CO_2 que se generan en la quema de los residuos donde encontramos que el mayor generador de CO_2 es la cebada.

Se determinaron las emisiones de carbono negro que se están generando para cada uno de los residuos donde encontramos que el mayor generador de carbono negro fue el algodón.

Se encontró que es necesaria la realización de diferentes pruebas para establecer las condiciones adecuadas para las quemas de cada uno de los cultivos, ya que en cada uno de ellos las condiciones suelen variar con respecto a la temperatura que se está emitiendo en la llama, la masa que se está alimentando y el tiempo que se establece de la quema en cada prueba debido a las características estructurales de cada tipo de cultivo.

Con base en los cálculos que se hicieron para determinar el porcentaje de humedad se demostró que los cultivos deben de estar en un rango entre 9.5-12.5%, ya que de no ser así puede haber variaciones significativas en los factores de emisión emitidos de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CN, OC, CO_2 , CO y CH_4 .

Las pruebas de quema para cada uno de los residuos agrícolas que son de una gran importancia en México y cuyos residuos se queman para su eliminación y preparación de la tierra para la siguiente cosecha, mostraron que tienen una composición química similar en cuanto al contenido de C, H, O, N y S, aunque los residuos de frijol tienen un contenido de carbono un poco más alto.

A pesar de que las composiciones químicas entre los residuos son similares, en los factores de emisión estimados de PM_{10} , $PM_{2.5}$, CN, OC, CO_2 , CO y CH_4 , se encontraron diferencias significativas, lo que muestra que la estructura de cada tipo de cultivo es distinta. Las emisiones contaminantes por la quema del algodón fueron las más altas.

Para el cuidado de la tierra y la calidad del aire es importante establecer programas que ayuden a difundir a los agricultores la importancia de no degradar el suelo y el aire con la quema de los residuos para así poder establecer formas menos dañinas para la disposición y/o eliminación de los residuos después del tiempo de cosecha.

VI. REFERENCIAS

- Algodón. 2015. Análisis de competitividad, Gobierno del estado de Chihuahua,
- Aguilar A y Schwentesius R. 2004. La producción de cebada maltera en México. CIESTAAM-PIAI-Universidad Autónoma de Chapingo.
- AIEG (AGENDA DE INNOVACIÓN ESTATAL DE GUANAJUATO) 2013, Fundación Guanajuato produce A. C.
- AIDA (Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente), 2011. El Carbono Negro: Concepto, Efectos Climáticos y Oportunidades en su Control. Colombia, 2011.
- Andreae, M. O., and P. Merlet. 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning, *Global Biogeochem. Cycles*, 15(4), 955 – 966, doi:10.1029/2000GB001382
- Alcasena-Gurupegui M. 2012. Estudio de la afección del nematodo de las agallas del cereal (*Anguina* sp), en cebada, Universidad Pública de Navarra, Escuela Técnica Superior en Ingeniería, Ingenieros Agrónomos.
- ASOPROL (Asociación de productores de Santa Lucía) 2009. Guía técnica para el cultivo de frijol en los municipios de Santa Lucía, Teustepe y San Lorenzo del Departamento de Boaco, Nicaragua.
- Bachmann, J., 2009. Black Carbon: A Science/Policy Primer. Pew Center on Global Climate Change.
- Badillo-Castañeda. 201, Caracterización del contenido de metales en partículas PM_{2.5} en dos zonas del Área Metropolitana de Monterrey, Tesis de Doctorado en Ciencias, Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Barry, R, G y Chorley, R. J. 2003. *Atmosphere, Weather, and Climate*, Routledge Taylor & Francis Group, Nueva York.
- Benavides-Ballesteros H. O. 2007. Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

- Bond, T.C., Anderson, T.L. and Campbell, D.E. 1999, Calibration and intercomparison of filterbased measurements of visible light absorption by aerosols. *Aerosol Sci. Technol.* 30(6):582-600.
- Bond, T.M., Streets, D.G, Yarber, K.F., Nelson, S.B., Woo, J., Klimont, Z., 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research* 108, D14203. doi:10.1029/2003JD003697
- Buchelli-Ramirez H, Fernández-Álvarez R., Rubinos-Cuadrado G., Martínez-González C., Rodríguez-Jerez F. y Casan-Clara P., 2014. Niveles elevados de carboxihemoglobina: fuentes de exposición a monóxido de carbono, Unidad de Gestión Clínica de Pulmón, Servicio de Neumología, Hospital Universitario Central de Asturias, Oviedo, Asturias, España.
- Caballero M., 2009. Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional, Informe SAGARPA, México.
- Calderón-García, J. O. 2015. Cambio climático en el centro de México: impacto en la producción de cebada (*Hordeum vulgare*) en Tlaxcala, Universidad Autónoma Indígena de México, Ra Ximhai, Revista de Paz, Interculturalidad y Democracia
- CCA. 2014, La quema de residuos agrícolas: fuente de dioxinas, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 6 pp
- CCAC. Climate and clean air coalition. 2014. Time to act to reduce short - lived climate pollutants. 2ª edición. Paris: UNEP, 2014. Disponible en: <http://www.unep.org/ccac/Portals/50162/docs/publications>
- Colque-Pinelo M. T. y Sánchez-Campos V. E. 2007. Los gases de Efecto Invernadero: ¿Por qué se produce el Calentamiento Global?. Asociación Civil Labor / Amigos de la Tierra – Perú. Marzo 2007
- Cronquist, A. 1981. An integrated system of classification of flowering plants. Columbia University Press, New York. 1202 p.

- Comité Consultivo Internacional del Algodón. 2010. Gobierno del estado de Chihuahua
<http://www.chihuahua.gob.mx/atach2/sdr/uploads/File/algodon.pdf>
- DGDC. 2015. Dirección general de divulgación de la ciencia. Una Mirada a la ciencia.
- Dinger D. Reología Para Ceramistas 1ra. Edición. 2010 pp 91.
- Dhammapala, R., Claiborn, C., Jimenez, J., Corkill, J., Gullett, B., Simpson, C., Paulsen, M., 2007. Emission factors of PAHs, methoxyphenols, levoglucosan, elemental carbon and organic carbon from simulated wheat and Kentucky bluegrass stubble burns. *Atmospheric Environment* 41, 2660–2669.
- Echeverri L., C. 2006. Determinación de la emisión de material particulado en fuentes fijas. Medellín, Colombia.
- EPA. 2000. Reference Methods for Emission Testing. EPA CFR40 PART 60, Appendix A. Reference Methods Listing.
- Espinosa-Pérez E. N. 2015. Clasificación de poblaciones nativas de frijol común del centro-sur de México por morfología de semilla, *Rev. Fitotec. Mex.* Vol. 29.
- FNDARFP (Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural Forestal y Pesquero) Panorama de la Cebada (2014), , Secretaria de Hacienda y crédito Público
- FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura) Frijol 2015, Panorama Agroalimentario, Dirección de investigación y Evaluación Económica y Sectorial. Fecha de consulta: 25 de noviembre de 2016. Disponible en:
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61950/Panorama_Agroalimentario_Frijol_2015.pdf
- García S. I. 2011 Guía de prevención, diagnóstico, tratamiento y vigilancia epidemiológica de las intoxicaciones por monóxido de carbono. - 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Salud de la Nación. Programa Nacional de Prevención y Control de las Intoxicaciones, 2011.

- González C.G. 2016. Adaptación del método isocinético para la toma de muestra de partículas por quema de biomasa. México, 2016.
- Greenpeace. 2009. Cambio climático: futuro negro para los páramos.
- Hays, M.D., Fine, P.M., Geron, C.D., Kleeman, M.J., Gullett, B.K., 2005. Open burning of agricultural biomass: physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment* 39, 6747–6764.
- IDEAM–METEO/008-2007 Nota técnica del IDEAM Original: Diciembre 2007 Información Técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático
- INIFAP. 2010. Diagnóstico de *fusarium* en el cultivo de cebada maltera en el Estado de Hidalgo.
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories
- IPCC, 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change.
- IPCC, 2013. Fifth assessment report of intergovernmental panel on climate change: The physical science basis.
- Janssen N., Gerlofs-Nijla M., Lanki T. Salonen R, Cassee F., Hoek G., Fischer P., Brunekreef B., Krzyzanowski M. Health Effects of Blackcarbon. WHO, 2012.
- Medina Valtierra Jorge, 2010. La Dieta del Dióxido de Carbono (CO₂) Conciencia Tecnológica, Aguascalientes, México, Instituto Tecnológico de Aguascalientes núm. 39, enero-junio, 2010, pp. 50-53.
- MC2, INECC (Molina Center for Strategic Studies in Energy and the Environment, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2013. Apoyo a la Iniciativa de Planificación Nacional sobre Contaminantes Climáticos de Vida Corta en México.
- Mugica-Alvarez V., Santiago-de la Rosa N., Figueroa-Lara J., Flores-Rodríguez J., Magaña-Reyes M. 2015. Emissions of PAHs derived from burning and processing of sugarcane in Chiapas and Morelos México. *The Science of the Total Environment*. 474-482.
- Muñoz-Saldaña, R. 2010. Frijol, Rica Fuente de Proteínas. CONABIO. *Biodiversidades*, 89:7-11

- Myers, R.A.M., Linberg, S.E., Cowley, R.A., 1979. Carbon monoxide poisoning: The injury and its treatment. J. Am. Coll. Emerg. Physicians 8, 479–484.
- Navarrete-R. D. 2015. Rendimiento y calidad de grano en líneas experimentales de cebada de dos hileras (*Hordeum distichum* L.). Instituto de enseñanzas e investigación en ciencias agrícolas, Campus Montecillo, Posgrado de Edafología.
- NMX-AA-009-SCFI- 1993 Determinación de flujo de gases en un conducto por medio del tubo de Pitot, la cual se basa en el método 1 de la EPA Determinación del punto y velocidad de toma de muestra para fuentes fijas y el método 2 de la EPA Determinación de la velocidad y tasa de flujo volumétrica de gases en la chimenea (Tubo Pitot tipo S)
- NMX-FF-043-SCFI-2003. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-cereal-cebada maltera (*Hordeum Vulgare* L. y *Hordeum distichum* L.). Especificaciones y métodos de prueba
- Ortúzar F. y Tornel C. 2016. Contaminantes Climáticos de Vida Corta Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (AIDA) en colaboración con el Instituto de Energía e Meio Ambiente (IEMA)
- Pérez H. M. E. 2012. Documento base de la especie *Gossypium hirsutum* L. para el análisis de riesgo ambiental, Instituto Nacional de Ecología, Dirección general, centro nacional de investigación y capacitación ambiental.
- Pope, C. A., 3Rd y Dockery, D. W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. Journal of the Air & Waste Management Association, 56(6): 709-742.
- RDU (Revista Digital Universitaria) 2007, Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. Volumen 8 Número 10 • ISSN: 1067-6079, 10 de octubre 2007
- Ramanathan V., Carmichael G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbón. Review article. Nature Publishing Group

- Retes L., 2015. Análisis de rentabilidad del cultivo de algodón en Sonora, Revista Mexicana de Agronegocios, vol. XIX, núm. 36, enero-junio, 2015, pp. 1156-1166
- SAGARPA -Firco, 2009. Estudio de gran visión y factibilidad financiera para el desarrollo de infraestructura y almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas.
- SAGARPA. 2013. Análisis de la cadena de valor en la producción de algodón en México, Informe final agosto de 2013, Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- SEDEMA 2011. Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5} Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología
- SEDEMA. 2012. Inventario de emisiones de contaminantes y de efecto invernadero 2012. Fecha de consulta 5 de marzo de 2017. <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=Z6Bhnml=&dc=Zg==>
- Seddon-Wallack J. and Veerabhadran-Ramanathan. 2009. The Other Climate Changers: Why Black Carbon and Ozone Also Matter. Foreign Affairs 88.September/
- Sistema producto frijol en Chihuahua. 2012 , Plan Rector 2012 del Sistema Producto Frijol en Chihuahua
- Solís-Ávila J.C. y Sheinbaum P. C. 2016. Revista Internacional contaminación ambiental. vol 32 Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma De México, Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Distrito Federal, México.
- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2017. <http://www.siap.gob.mx/> (Consulta: Marzo 2017).
- UNEP, WMO. 2011. Integrated assessment of black carbon and tropospheric ozone. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- USEPA,1995. Course 450 Source Sampling for Particulate Pollutants.

- Watson, J. G., Chow, J. C., & Chen, L. W. A. 2005. Summary of organic and elemental carbon/black carbon analysis methods and intercomparisons. *Aerosol Air Qual. Res.* 5(1), 65-102.
- Zhang, H., Ye, X., Cheng, T., Chen, J., Yang, X., Wang, L., Zhang, R., 2008. A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory. *Atmos. Environ.* 42, 8432–8441.